إطار ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع وإدارة استخداماته بتكامل الجو والأرض: من منظور الحيز الإقليمي

المؤلفون

آن بي بين، شو شياو لي، دانغ آن رونغ، سون جيو هو، لي شيانغ يو، رونغ يويه جينغ

الملخص

في ظل التطور السريع لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة، والتحول نحو حوكمة الحيز الإقليمي على كامل النطاق وبكامل العناصر، يحظى المجال الجوي منخفض الارتفاع باهتمام متزايد بوصفه موردا إقليميا ثلاثي الأبعاد من نوع جديد. غير أن الأسلوب التقليدي في ترسيم هذا المجال يركز على التشغيل الجوي أكثر من وظائف الأرض، ولذلك يصعب عليه الاستجابة لأنشطة منخفضة الارتفاع متنوعة مثل التوصيل اللوجستي، والإنقاذ الطارئ، والطيران المأهول. ومن منظور اقتران منظومة الجو والأرض، ترى هذه الدراسة أن ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع ينبغي أن ينتقل من منطق ضبط المسارات إلى حوكمة الفضاء ثلاثي الأبعاد. وتوضح الدراسة خصائص هذا المجال بوصفه موردا إقليميا، وتكشف علاقة الاقتران بين المرور الجوي واستخدام الأرض، وتبني نظاما تقنيا لترسيم الحدود الجوية والأرضية بصورة منسقة، وتقترح إطارا لإدارة الاستخدام يجمع بين تقسيم الاستخدامات إلى مناطق وتصنيفها. وبالاستناد إلى حالة مدينة جينان، تتحقق الدراسة من علمية الإطار وقابليته للتشغيل، وتقدم دعما منهجيا ومرجعا لصنع القرار من أجل التخصيص الكفء لموارد الارتفاعات المنخفضة والتنمية عالية الجودة لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة.

الكلمات المفتاحية

المجال الجوي منخفض الارتفاع؛ تقنية الترسيم؛ إدارة الاستخدام؛ التنسيق بين الجو والأرض؛ استخدام موارد الارتفاعات المنخفضة

المقدمة

مع دخول التحول الاقتصادي في الصين مرحلة حاسمة، أصبح اقتصاد الارتفاعات المنخفضة شكلا صناعيا ناشئا ومحركا جديدا للنمو [1-2]. فقد ظهرت بسرعة سيناريوهات مثل لوجستيات الطائرات المسيّرة، والنقل الجوي الحضري (UAM)، والسياحة الثقافية منخفضة الارتفاع، مما جعل الطيران منخفض الارتفاع أكثر تواترا وتنوعا ودقة [3-8]. وفي الوقت نفسه، بدأت مفاهيم مثل التنمية الموجهة بالنقل منخفض الارتفاع أو التنمية العمودية (VOD) تحظى بالاهتمام. وهي تؤكد التنظيم المنسق بين شبكات النقل منخفض الارتفاع، ومرافق الإقلاع والهبوط العمودية، والفضاء الوظيفي الحضري، وتفرض متطلبات غير مسبوقة على قدرة عرض موارد المجال الجوي منخفض الارتفاع، وطريقة تنظيمها، ودقة إدارتها [9]. وبوصفه الحامل المكاني الأساسي لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة، تؤثر بنية التخطيط وتقنيات الترسيم وإدارة الاستخدام لهذا المجال مباشرة في سلامة الطيران وكفاءة التشغيل، ثم في جودة التوسع الصناعي وحدوده العليا [10].

ينبع ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع تقليديا من منطق إدارة الطيران، إذ يركز على تنظيم تدفقات الحركة الجوية ولا يولي اهتماما كافيا لوظائف الحيز الأرضي، والقدرة البيئية على التحمل، والتعرض للمخاطر. ويؤدي هذا المسار، الذي يغلّب الجو ويهمل الأرض، إلى عدم تطابق بين العناصر الجوية والأرضية، وإلى صراعات بين أنشطة الطيران والبيئة الحضرية، وإلى تعايش نقص العرض المحلي مع الموارد المعطلة [8]. وبالمقارنة مع النمو السريع في طلب اقتصاد الارتفاعات المنخفضة في الصين، لا يزال نظام إدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع متأخرا في التكنولوجيا ونمط الحوكمة. وتتركز الاختناقات في أساليب الترسيم وآليات إدارة الاستخدام التي لم تعد قادرة على التكيف مع متطلبات تشغيل الأنماط الجديدة [11-12].

لذلك يصبح تحديث منطق إدارة استخدام المجال الجوي منخفض الارتفاع وتعزيز التنسيق بين الجو والأرض أمرا ضروريا. ويتسق هذا المطلب مع توجه الصين نحو ضبط الحيز الإقليمي على كامل النطاق وبكامل العناصر [13-14]، كما ينسجم مع الاتجاهات الدولية في إدارة الارتفاعات المنخفضة [15-16]. وجوهر التنسيق بين الجو والأرض هو كسر الحواجز الإدارية بين ترسيم المجال الجوي وحوكمة الفضاء الأرضي، وبين التشغيل الجوي وخدمات الرقابة الأرضية. وبالاستناد إلى إدارة الموارد الطبيعية ومنصة «الخريطة الواحدة» للتخطيط المكاني الإقليمي، يمكن تحديد العناصر الرئيسية لأنشطة الارتفاعات المنخفضة، والمرافق الأرضية، والوظائف الحضرية، ومخاطر السلامة، وقواعد الحوكمة. وعلى هذا الأساس، تستعرض الدراسة حدود الأدبيات القائمة وتبني إطارا متكاملا لتقنيات الترسيم وإدارة الاستخدام بتكامل الجو والأرض. ويثري هذا الإطار نظرية الحوكمة ثلاثية الأبعاد للحيز الإقليمي، ويوفر منهجية قابلة للتشغيل لحوكمة أدق للمجال الجوي منخفض الارتفاع.

1 تقدم البحوث في ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع وإدارة استخدامه

1.1 مفهوم المجال الجوي منخفض الارتفاع وخصائصه

المجال الجوي منخفض الارتفاع مورد إقليمي ثلاثي الأبعاد يتأثر بعمق ببيئة السطح والنشاط البشري. وهو غير مهيكل، عالي التباين، وشديد الاقتران بسطح الأرض [19-21]. وتحدد ندرته وقيود سعته وآثاره الخارجية من حيث المخاطر أن تطويره واستخدامه ينبغي أن ينسقا بين السلامة والكفاءة ومتطلبات الحوكمة من منظور الحيز الإقليمي [22-25]. ولذلك يجب أن تتجاوز إدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع الفصل بين الجو والأرض. وينبغي أن تمتد إدارة الاستخدام إلى الفضاء ثلاثي الأبعاد عبر التقسيم المكاني، وقيود القواعد، والحوكمة المنسقة، بحيث ترتبط بدقة بالنمط الوظيفي للحيز الإقليمي [26-29]. ومع نمو لوجستيات الارتفاعات المنخفضة والنقل الجوي الحضري والقطاعات المرتبطة بها، تصبح السمة الاقتصادية لهذا المجال بوصفه عامل إنتاج جديدا أكثر وضوحا. ومن ثم يجب أن يعزز إطاره الإداري التخصيص الكفء للموارد والتنمية المنظمة لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة، مع الحفاظ على الحد الأدنى للسلامة [30-36].

1.2 تطور تقنيات ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع

استمدت أفكار ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع في بدايتها أساسا من تخطيط المجال الجوي التقليدي للطيران ومن بحوث سلامة التشغيل. وكانت أسس الترسيم تتركز على إمكانية الطيران وتجنب العوائق، مثل تنظيم المسارات أو الممرات، وخلو العوائق، واتصال نقاط الإقلاع والهبوط، وفواصل الفصل [15,19]. وتتمتع هذه الأساليب، التي يقودها منطق التشغيل الجوي، بفاعلية في الحفاظ على النظام الأساسي للمجال الجوي. لكنها في البيئات الحضرية الكثيفة، حيث تتجاور وتتراكب أنشطة منخفضة الارتفاع، تواجه عادة تباينا كبيرا في التعرض للمخاطر الأرضية، ولا تجانسا عاليا في القيود المكانية، وضعفا في الاتساق العابر للمناطق. وغالبا ما تظهر نتائجها في صورة ممرات مجزأة، كما يصعب عليها وصف الفروق الرأسية بدقة.

منذ منتصف العقد الثاني من القرن الحادي والعشرين ونهايته، أدى صعود نظم UTM وU-space الداعمة للتشغيل الواسع للطائرات المسيّرة إلى دفع نموذج جديد يضع خصائص الحيز الإقليمي شرطا سابقا. وتبين الخبرات الدولية في تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع للطائرات المسيّرة أن الولايات المتحدة والدول الأوروبية واليابان تدرج عادة تصنيف المخاطر، والأسوار الجغرافية، وسيناريوهات التشغيل، وتنظيم المسارات، والرقابة الرقمية ضمن التخطيط [37]. وفي هذا التحول، لم يعد الترسيم يعتمد فقط على إمكانية الطيران وتجنب العوائق واتصال المسارات، بل أدخل أيضا تعرض السكان، ووظائف السطح والأهداف الحساسة، وشكل المباني وارتفاعها، وممرات البنية الأساسية الرئيسية، والمناطق الحساسة بيئيا، بوصفها قيودا أساسية. ويعبّر عن الترسيم ثلاثي الأبعاد عبر الجمع بين الطبقات الرأسية، وتنظيم الممرات والعقد، والمناطق الجغرافية. وأصبحت المناطق الجغرافية حاملا رئيسيا لنشر القواعد واسترجاعها وتحديثها رقميا [38-39]، بما ينقل الترسيم من تحسين بسيط لتجنب العوائق والاتصال إلى وصف متكامل للاقتران بين المخاطر المكانية وخصائص السطح والطلب التشغيلي.

طورت الولايات القضائية المختلفة مسارات متمايزة [15,30,40-44]. فالولايات المتحدة تميل إلى التنظيم الفئوي والإدارة الديناميكية على نطاقات واسعة. أما الاتحاد الأوروبي فبنى تدريجيا منظومة مناطق جغرافية وقواعد U-space للبيئات المعقدة عالية الكثافة. وتشدد اليابان على مواءمة التقدم التقني والمؤسسي في تطبيقات الارتفاعات المنخفضة الحضرية مع شروط الفضاء الحضري. إجمالا، تنتقل تقنية ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع من منطق التشغيل الجوي، الذي يتمحور حول المسارات وتجنب العوائق، إلى منطق الحيز الإقليمي، الذي يتمحور حول المناطق الجغرافية والقيود الثلاثية الأبعاد المتكاملة.

الجدول 1. مقارنة مبادئ ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع ونماذج تصنيفه

الدولة أو المنطقة	مبدأ الترسيم الأساسي	منطق تصنيف المجال الجوي	عناصر الترسيم الرئيسية
الولايات المتحدة	السلامة أولا؛ الانفتاح والكفاءة	اتباع فئات ICAO/FAA من A إلى G؛ يغلب استخدام Class G في الارتفاعات المنخفضة	تشكل الفئات القائمة والمجال الخاضع للمطارات الإطار الأساسي مع ترسيم ديناميكي
الاتحاد الأوروبي	موجه بالمخاطر؛ تنسيق الجو والأرض	مناطق U-space الجغرافية هي المحور؛ الدخول بحسب تراكم المخاطر	إدارة هرمية للمناطق الجغرافية مع ممرات المسارات

اليابان	أولوية السلامة الحضرية؛ تكامل الجو والأرض	اتباع منطق ICAO والتركيز على سيناريوهات AAM الخاصة	تنظيم متكامل للممرات، ومهابط الإقلاع والهبوط العمودي، ومناطق التشغيل
كندا	وضوح القواعد؛ توجيه بالمسؤولية	استخدام نظام فئات ICAO من A إلى G	فئات المجال الجوي هي الأساس مع مناطق حظر وتقييد بحسب المخاطر
أستراليا	تصنيف المخاطر؛ تبسيط القواعد	اتباع منطق تصنيف ICAO	اعتماد القيود الجغرافية وشروط التشغيل مع تجنب إعادة البناء المعقدة
المملكة المتحدة	الجمع بين السلامة والابتكار؛ ترسيم تدريجي	الارتكاز على المجال الخاضع وغير الخاضع للرقابة والربط مع U-space	اعتماد Class G محورا والتقدم نحو هندسة الممرات والعقد

1.3 تقدم إدارة الاستخدام والربط التخطيطي

في ظل حوكمة كامل النطاق وكامل العناصر، يصبح الربط العلمي بين إدارة استخدام المجال الجوي منخفض الارتفاع والتخطيط المكاني الإقليمي محوريا لمعالجة تعارضات الموارد منخفضة الارتفاع. دوليا، يمكن تصنيف الربط بين إدارة الاستخدام والتخطيط إلى ثلاثة أنماط: التوجيه السوقي، والتمكين التقني، والتنظيم الإداري. تعتمد الولايات المتحدة أساسا على التوجيه السوقي لتكييف موارد المجال الجوي منخفض الارتفاع مع الطلب [30]. وتعتمد اليابان بدرجة أكبر على سيناريوهات الطيران والملاءمة التقنية. أما الدول الأوروبية فتجمع بين الأطر التنظيمية والرقابة السوقية. وتؤكد كندا وأستراليا والمملكة المتحدة السلامة الإقليمية، وإن كان الإفراط في التوجه الأمني قد يحد من الابتكار. ورغم تغطية نظم إدارة الاستخدام عددا كبيرا من الدول، فإنها عموما ما تزال تعاني ضعف التنسيق بين الجو والأرض، ونقص آليات الموازنة بين الأهداف المتعددة، ومحدودية الربط بين الحوكمة الجوية والأرضية.

بدأت الصين كذلك في تطوير خبرات محلية في ضبط استخدام فضاء الارتفاعات المنخفضة. ومن خلال التركيز على الإدارة التعاونية بين الحيز الإقليمي والمجال الجوي منخفض الارتفاع، حاولت الصين تمديد خبرة ضبط الحيز الإقليمي إلى مجال الارتفاعات المنخفضة. وقد تشكلت أوليا آلية حوكمة يضع فيها المستوى المركزي الإطار المؤسسي العام، بينما تفصل الحكومات المحلية قواعد التنفيذ، بما يوازن بين وحدة النظام وملاءمته المحلية. وتؤكد الأعمال الحديثة بصورة متزايدة تحديد عناصر الجو والأرض، ومواءمة سيناريوهات التشغيل، وتخطيط شبكات المرافق، وآليات الاستجابة التخطيطية في التخطيط الحضري منخفض الارتفاع [18]. كما تستخدم تقييم القدرة الاستيعابية، وتحديد المناطق المقيدة، وحسابات دمج البيانات متعددة المصادر لتحسين الأساس العلمي للإدارة [25,45]. ويوفر التقدم التقني في تخطيط مسارات الطائرات المسيّرة، والاتصال والاستشعار المتكاملين (ISAC)، والإدارة المشتركة للموارد دعما إضافيا لتنظيم المسارات وتخصيص المجال الجوي والتحكم التعاوني بين الجو والأرض [46].

ومع ذلك تبقى أوجه قصور واضحة. فعلى مستوى التنفيذ، لم تتضح بالكامل حدود الحقوق والمسؤوليات بين الإدارة الجوية والضبط الأرضي. ووفقا لتوجيهات مجلس الدولة بشأن تعزيز الطيران العام، تتطلب حوكمة المجال الجوي منخفض الارتفاع تنسيقا بين الطيران العسكري والمدني والحكومات المحلية والإدارات المعنية؛ لكن بعض المناطق لم تنشئ بعد آليات فعالة للربط بين الإدارات، مما يؤدي إلى انفصال بين إدارة المجال الجوي وتخطيط البنية الأساسية وتنفيذ المشاريع. وعلى مستوى الربط المؤسسي، لم تندمج إدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع بما يكفي مع متطلبات تجنب المناطق الأرضية ذات الوظائف الخاصة والقيود المتعلقة بالعوائق النموذجية. وبوجه عام، لا تزال الأساليب الحالية عاجزة عن إدخال الحدود المكانية الأرضية بشكل كاف في عملية ترسيم المجال الجوي، ومن ثم لا تستطيع دعم التخصيص الدقيق والكفء لموارد الارتفاعات المنخفضة في السيناريوهات العابرة للمناطق والقطاعات.

الجدول 2. مقارنة نظم إدارة استخدام المجال الجوي منخفض الارتفاع

الدولة أو المنطقة	القوانين أو السياسات الأساسية	الجهة الرقابية	توجه الإدارة

الولايات المتحدة	قانون الطيران الفيدرالي (1958)؛ قاعدة الطائرات المسيّرة الصغيرة Part 107 (2016)؛ قانون تنسيق وقيادة النقل الجوي المتقدم (2022)	إدارة الطيران الفيدرالية FAA	توجيه سوقي وقواعد تشغيل ديناميكية
الاتحاد الأوروبي	لائحة الاتحاد الأوروبي للطائرات المسيّرة (2019)؛ إطار U-space التنظيمي (2023)	وكالة سلامة الطيران الأوروبية EASA والسلطات الوطنية للطيران NAA	ضبط مخاطر قائم على المناطق الجغرافية ونشر رقمي للقواعد
اليابان	قانون الطيران (2022)؛ خارطة طريق النقل الجوي المتقدم AAM (2018)	مكتب الطيران المدني الياباني JCAB	سلامة حضرية موجهة بالسيناريو وتنسيق AAM
كندا	قانون الطيران (1985)؛ لوائح الطيران الكندية Part IX للطائرات المسيّرة (2019)	وزارة النقل الكندية	مسؤوليات تشغيل واضحة وامتثال للسلامة
أستراليا	لوائح سلامة الطيران المدني Part 101 للطائرات المسيّرة (2002)؛ قانون المجال الجوي (2007)	هيئة سلامة الطيران المدني CASA	ضبط متدرج بحسب المخاطر وقواعد مبسطة
المملكة المتحدة	أمر الملاحة الجوية (2016)	هيئة الطيران المدني CAA	إدارة تدريجية تربط المجال الخاضع للرقابة بمنظومة U-space

2 المجال الجوي منخفض الارتفاع في ظل اقتران منظومة الجو والأرض

2.1 تحديد الخصائص: المجال الجوي منخفض الارتفاع بوصفه موردا إقليميا

يختلف المجال الجوي منخفض الارتفاع عن موارد الأرض التي يمكن تخصيصها بالكامل بآليات السوق، كما يختلف عن فضاءات حظر الطيران الخاضعة لضبط إداري كامل. فهو مورد مكاني شبه عام يتطلب توازنا ديناميكيا بين المصلحة العامة وكفاءة التشغيل. لذلك ينبغي أن ينتقل الافتراض النظري لترسيمه من تصنيف المجال الجوي التقليدي إلى التعبير عنه كمورد مكاني. فمن خلال توضيح الحدود المكانية، وخصائص الحقوق، وتخصيص حقوق التطوير، وشروط الدخول إلى الاستخدام، وتوزيع المنافع، وقيود السلامة العامة، يمكن أن يصبح المجال الجوي منخفض الارتفاع موردا ثلاثي الأبعاد قابلا للتحديد والقياس والتخصيص والإدماج في نظام إدارة التخطيط [36]. ويشكل هذا التحويل من «فضاء طيران» إلى «مورد مكاني» المنطق الأساسي للترسيم المتكامل بين الجو والأرض.

2.2 آلية الاقتران: التفاعل بين الحيز الإقليمي وموارد الارتفاعات المنخفضة

من منظور تكامل النظام المكاني، يشكل الحيز الإقليمي وموارد الارتفاعات المنخفضة منظومة اقتران مكاني متداخلة رأسيا ومتبادلة القيود. ويتمثل هذا التفاعل في ثلاث آليات: قيود الخلفية المكانية، والتكيف الوظيفي، والنقل المنسق للمخاطر. فالمناطق السياسية والعسكرية الحساسة، والتضاريس والجيومورفولوجيا، وملامح ارتفاع المباني، وغيرها من العناصر الأساسية في الحيز الإقليمي، تحدد مباشرة النطاق القابل للاستخدام والعتبات التشغيلية للمجال الجوي منخفض الارتفاع، وتشكل قيودا صلبة على تطوير الموارد. وفي المقابل، فإن تركز أنشطة مثل التفتيش منخفض الارتفاع، واللوجستيات الجوية، والنقل الجوي الحضري، يوجه توزيع نقاط الإقلاع والهبوط الأرضية، ومرافق الدعم، وشبكات الخدمة، ويدفع استخدام الحيز الإقليمي نحو توسع ثلاثي الأبعاد.

ويعني الاقتران العميق بين الوظيفة والمخاطر أن ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع يجب أن يرتبط بضبط استخدامات الحيز الإقليمي. فتقسيم الوظائف الأرضية يحدد كثافة الاستخدام منخفض الارتفاع ومستوى التحكم؛ والمناطق الكثيفة السكان أو

الحساسة بيئيا تقابلها قواعد دخول وعتبات سلامة متمايزة. وفي الوقت نفسه، تؤثر مخاطر سلامة الطيران منخفض الارتفاع وآثاره البيئية الخارجية مباشرة في المصلحة العامة على السطح. لذلك لا يكون اقتران الجو والأرض مجرد تداخل فيزيائي للفضاء، بل هو أيضا اقتران مؤسسي بين منطق التخطيط وقواعد الضبط ومسؤوليات الحوكمة، وهو الأساس الداخلي لإعادة بناء نظرية ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع.

توفر خاصية التغطية الكاملة والتحكم بكامل العناصر في التخطيط المكاني الإقليمي قاعدة أساسية لحوكمة موارد الارتفاعات المنخفضة. فرغم أن منصات إدارة عمليات الطيران منخفض الارتفاع القائمة تظهر شكلا أوليا من الحوكمة الثلاثية الأبعاد، فإنها لا تزال تحتاج إلى قيادة التخطيط المكاني الإقليمي لتحقيق تنسيق عميق بين ضبط الجو والأرض وربط القواعد. ويجب أن يعتمد البناء النظري لحوكمة موارد الارتفاعات المنخفضة من منظور الحيز الإقليمي على إطار ضبط التخطيط المكاني الإقليمي، وأن يربط نظام إدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع، وأن يوضح آلية التأثير المتبادل التي تشكل بها الأرض المجال الجوي ويؤثر بها التشغيل الجوي راجعا في استخدام الأرض، وأن يدعم التخصيص المنسق للموارد الإقليمية وموارد الارتفاعات المنخفضة.

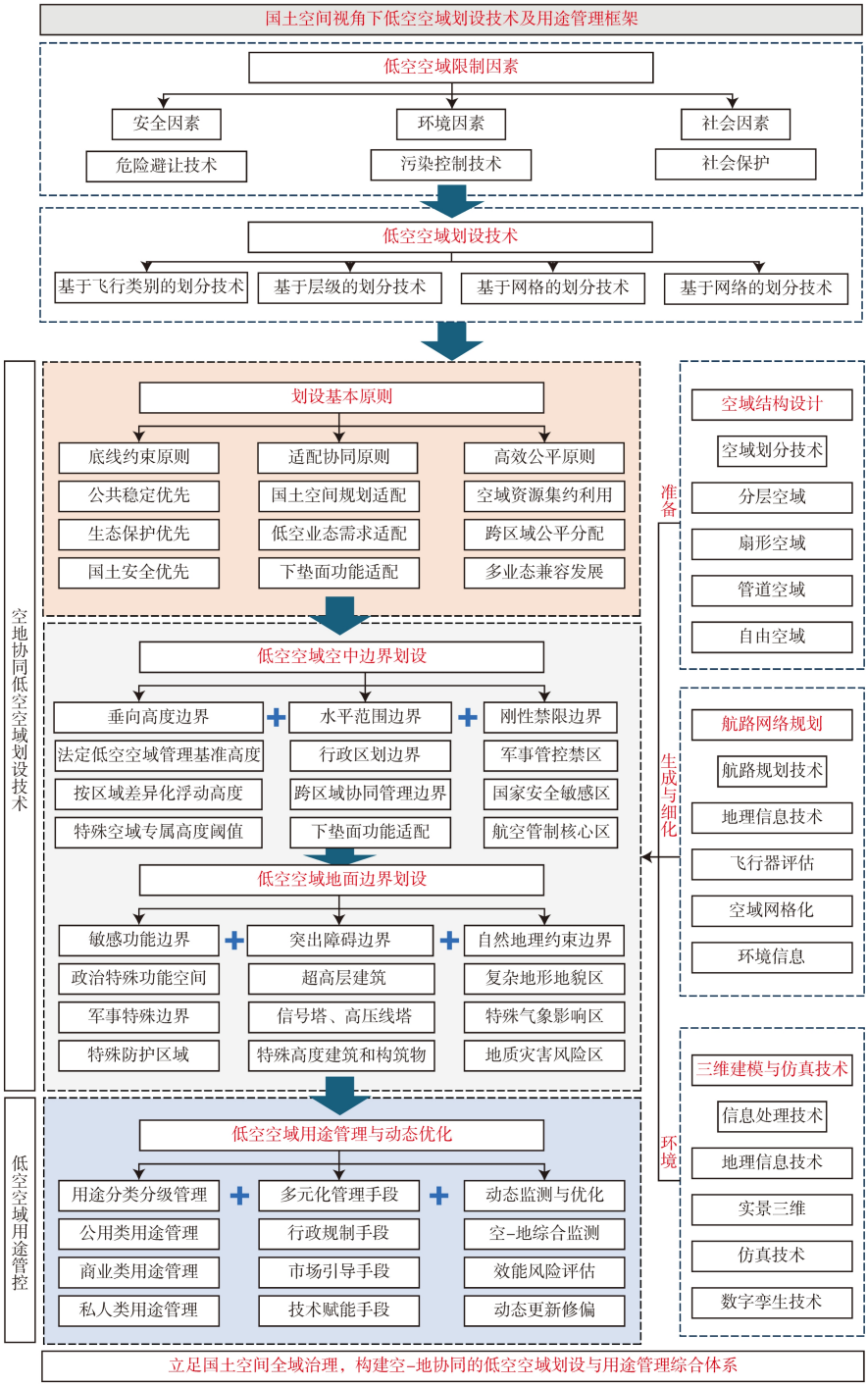
3 تقنيات ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع وإطار إدارة استخدامه من منظور الحيز الإقليمي

3.1 بناء الإطار: من التعرف على العناصر إلى الترسيم المتكامل بين الجو والأرض

يتجاوز التنسيق بين الجو والأرض المنطق الأحادي الذي يجعل العوائق الأرضية مجرد قيود على الطيران. فهو يؤكد الاقتران الديناميكي: فمن جهة تحدد الوظائف الأرضية وكثافة السكان وشكل المباني مستوى المخاطر وشروط الدخول إلى المجال الجوي منخفض الارتفاع؛ ومن جهة أخرى، يفرض ترسيم المسارات الجوية ومناطق التشغيل متطلبات عكسية على توزيع مرافق الإقلاع والهبوط، ونقاط الحساسية للضوضاء، والبنية الأساسية الداعمة.

ومن حيث الآلية المكانية، لا تعتمد ملاءمة المجال الجوي منخفض الارتفاع على شروط التشغيل الجوي فقط، بل تتشكل بعمق بفعل البنية المكانية الأرضية. فالشكل الوظيفي الحضري، وممرات البنية الأساسية، والقيود البيئية، والمرافق الحساسة، تحدد معا النطاق القابل للاستخدام ومخاطر التشغيل في هذا المجال. ومن خلال تراكب عناصر الجو والأرض، تؤثر هذه العوامل في قابلية الوصول والسلامة والكفاءة. لذلك ينبغي للترسيم المتكامل بين الجو والأرض أن يصف التفاعل داخل إطار مكاني حضري ثلاثي الأبعاد، لا أن يعامل الفضاء الأرضي بوصفه مجموعة قيود سلبية فقط. وظيفيا، تخدم أنشطة الارتفاعات المنخفضة أساسا وظائف حضرية أرضية، ولذلك يجب أن تتوافق مع التقسيم الوظيفي الأرضي. وحوكميا، يتطلب المجال الجوي منخفض الارتفاع إدارة مشتركة بين عدة إدارات؛ ومن ثم ينبغي للتنسيق بين الجو والأرض أن يستخدم وحدات مكانية وقواعد موحدة لربط إدارة التشغيل بإدارة الاستخدام، بما يخفض الاحتكاك المؤسسي.

تقترح الدراسة إطارا شاملا يتكون من قيود المجال الجوي منخفض الارتفاع، وتقنيات الترسيم، ومبادئ الترسيم، وترسيم الحدود الجوية والأرضية، والترسيم المتكامل بين الجو والأرض، وإدارة الاستخدام مع التحسين الديناميكي (الشكل 1). ويستند الإطار إلى حوكمة كامل النطاق ويعامل السلامة وحماية البيئة والتخصيص الكفء للموارد بوصفها متطلبات متكاملة.



الشكل 1. منظومة ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع وإدارة استخدامه بتكامل الجو والأرض

3.2 مبادئ الترسيم الأساسية

يتبع الإطار المقترح ثلاثة مبادئ أساسية. أولا، مبدأ قيد الحد الأدنى، وهو يعطي الأولوية للاستقرار العام، وحماية البيئة، وأمن الحيز الإقليمي الوطني. فمناطق التحكم العسكري، والمناطق الحساسة للأمن الوطني، والمناطق الجوهرية لضبط الطيران، وغيرها من القيود الصلبة، يجب استبعادها أو ضبطها بصرامة. ثانيا، مبدأ التكيف والتنسيق، ويتطلب أن يتوافق المجال الجوي منخفض الارتفاع مع التخطيط المكاني الإقليمي، واحتياجات أنشطة الارتفاعات المنخفضة، ووظائف السطح الأدنى. ثالثا، مبدأ الكفاءة والإنصاف، ويؤكد

الاستخدام المكثف لموارد المجال الجوي، والتوزيع العادل عبر المناطق، والتوافق بين الصناعات المتعددة. وتتيح هذه المبادئ لترسيم المجال الجوي أن يوازن بين السلامة العامة والطلب التشغيلي وكفاءة الموارد.

3.3 تقنية الترسيم المتكامل بين الجو والأرض

3.3.1 ترسيم الحدود الجوية

يشمل ترسيم الحدود الجوية الحدود الرأسية للارتفاع، والحدود الأفقية للنطاق، والحدود الصلبة للحظر أو التقييد. ففي البعد الرأسي، ينبغي الجمع بين الارتفاع المرجعي القانوني لإدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع والارتفاعات العائمة المتمايزة إقليميا والعتبات الخاصة لبعض المجالات. وعمليا يمكن تقسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع بحسب الارتفاع الحقيقي إلى طبقات متعددة، مثل طبقات التشغيل شديدة الانخفاض، والمنخفضة، والمتوسطة المنخفضة، بما يقابل على التوالي عمليات الطائرات المسيّرة الصغيرة، ومناطق إدارة الطائرات الخفيفة والصغيرة، ومناطق دمج الطيران العام.

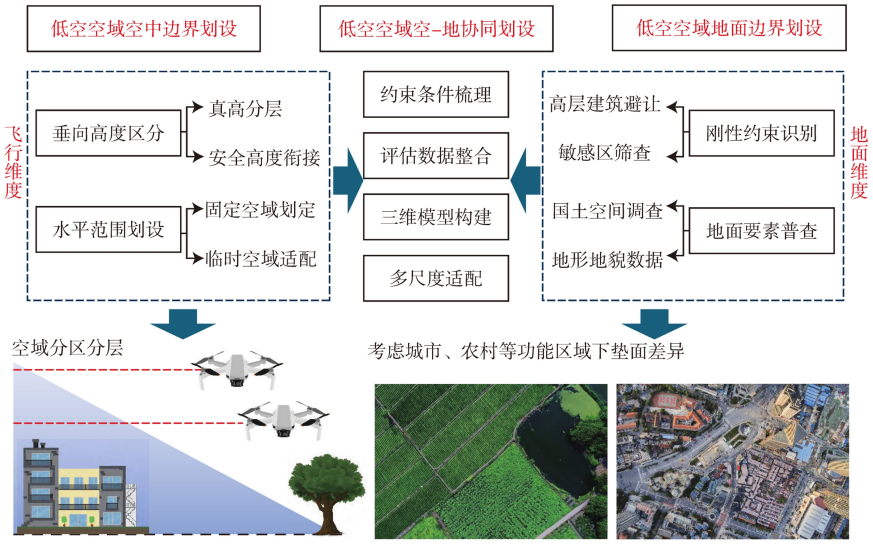
وفي البعد الأفقي، ينبغي أن تحل البيانات الجغرافية عالية الدقة وبيانات الصين ثلاثية الأبعاد الواقعية محل نموذج المسار التقليدي من نقطة إلى نقطة. ويمكن لتقنية الشبكة ثلاثية الأبعاد أن تقسم المجال الجوي إلى فوكسلات، وتحسب غلاف خلو المباني وأحزمة الفصل الآمن، وتولد أسوارا جغرافية رقمية. وينبغي الجمع بين المجالات الثابتة والمؤقتة بحسب سيناريوهات الطيران. ويمكن ترسيم المجال المؤقت ضمن نوافذ زمنية محددة لدعم السياحة منخفضة الارتفاع، والإنقاذ الطارئ، وغيرها من الأنشطة الديناميكية. ومن خلال دمج النمذجة الواقعية ثلاثية الأبعاد، وتحليل العوائق، وتحليل ارتفاع الطيران، وتجنب التعارضات، يمكن التعبير عن الحدود الجوية بوحدات مكانية دقيقة وقابلة للتحديث.

3.3.2 ترسيم الحدود الأرضية

يشمل ترسيم الحدود الأرضية حدود الوظائف الحساسة، وحدود العوائق البارزة، وحدود القيود الجغرافية الطبيعية. وتشمل حدود الوظائف الحساسة الفضاءات السياسية والعسكرية الخاصة، ومناطق الحماية الخاصة، ومناطق تجنب البنية الأساسية العامة. وتشمل حدود العوائق البارزة المباني العالية، وأبراج الإشارة، وأبراج الجهد العالي، والمباني أو المنشآت ذات الارتفاعات الخاصة. أما حدود القيود الجغرافية الطبيعية فتشمل مناطق التضاريس والجيومورفولوجيا المعقدة، والمناطق المتأثرة بظروف جوية خاصة، ومناطق مخاطر الكوارث الجيولوجية. ويحوّل ترسيم الحدود الأرضية المخاطر الأرضية إلى قيود مكانية على المجال الجوي منخفض الارتفاع، ويوفر أساسا لتمايز شروط الدخول وكثافة التشغيل.

3.3.3 الترسيم المتكامل بين الجو والأرض

يربط الترسيم المتكامل بين الجو والأرض بين الطبقات الجوية والتقسيم الأرضي. ويشمل سير العمل تحديد القيود، ودمج بيانات التقييم، وبناء نماذج ثلاثية الأبعاد، وفحص المناطق الحساسة، وإدخال بيانات المسح المكاني الإقليمي وبيانات التضاريس والجيومورفولوجيا. كما يجب أن يأخذ في الاعتبار اختلاف وظائف السطح الأدنى بين المناطق الحضرية والريفية والبيئية. والنتيجة هي منظومة ترسيم متعددة المقاييس تربط الحدود الجوية والحدود الأرضية وقيود الاقتران بين الجو والأرض، وتوفر دعما مكانيا للتنمية عالية الجودة لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة (الشكل 2).



الشكل 2. الإطار التقني لترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع من منظور الحيز الإقليمي

3.4 التصميم المؤسسي لإدارة الاستخدام بتكامل الجو والأرض

3.4.1 المنطق المؤسسي لإدارة الاستخدام في ظل التنسيق بين الجو والأرض

تمثل إدارة الاستخدام بتكامل الجو والأرض وسيلة رئيسية للاستخدام الكفء لموارد الارتفاعات المنخفضة وضمان أمن الحيز الإقليمي. وبالاستناد إلى القواعد المؤسسية والرقابة ذات الحلقة المغلقة، ينبغي أن ترتبط بعمق بنظام التخطيط المكاني الإقليمي القائم وأن تنفذ عمليا. ويستجيب ذلك لأوجه القصور الراهنة في الصين، ومنها ضعف الربط بين نظام إدارة الاستخدام ونظام التخطيط، وصعوبة إدماج متطلبات الإدارة في إجراءات تنفيذ التخطيط. كما يدعم الاندماج بين الطيران العام واقتصاد الارتفاعات المنخفضة كما يتطلبه تخطيط نظام النقل الشامل الحديث.

يمر الإطار بإدارة استخدام المجال منخفض الارتفاع عبر عملية تخطيط المجال الجوي وتنفيذه وتقييمه كاملة. وفي تصنيف الاستخدامات، يميز بين الاستخدامات الطارئة، والتجارية، والخدمة العامة، وتشغيل الصناعات، ويصوغ معايير متمايزة. كما ينشئ علاقة متعددة الأبعاد بين نوع استخدام الأرض الإقليمية، ونوع النشاط منخفض الارتفاع، ومستوى شدة التحكم. وفي التنفيذ، يعزز التكامل بين الربط التخطيطي، والتمكين التقني، والتنسيق بين الإدارات، ويحافظ على حد السلامة، ويدعم الاستخدام الكفء للموارد.

3.4.2 تقسيم الاستخدام الموجه إلى التخطيط المكاني الإقليمي

على مستوى تحسين التخطيط، ينبغي إدراج محتوى إدارة الارتفاعات المنخفضة صراحة في التخطيط العام للحيز الإقليمي، والتخطيط التفصيلي، والتخطيط الشامل للنقل، والخطط المتخصصة ذات الصلة. وينبغي أن يوضح التخطيط العام المناطق الوظيفية منخفضة الارتفاع والمتطلبات الاستراتيجية. أما التخطيط التفصيلي فيجب أن يفصل الوحدات المكانية ومتطلبات التحكم. وينبغي للتخطيط المتخصص أن يربط البنية الأساسية منخفضة الارتفاع، والمسارات، والممرات، وسيناريوهات التشغيل. وفي التنفيذ، يجب ربط متطلبات إدارة الارتفاعات المنخفضة بتراخيص التخطيط، وبناء آليات مشتركة بين الإدارات تصل بين إدارة الارتفاعات المنخفضة وتخطيط البنية الأساسية وموافقات المشاريع.

ويجب أن يعتمد التحديث الديناميكي على مخطط التخطيط الوطني للفترة 2021-2035، وعلى تغير أنماط أنشطة الارتفاعات المنخفضة والطلب التشغيلي. وينبغي تحسين قواعد الإدارة وحدود المناطق دوريا، وأن تغذي نتائج التنفيذ مراجعة التخطيط عبر حلقة مغلقة من الإعداد والتنفيذ والتقييم والتعديل، بما يضمن استمرار تنسيق إدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع مع نظام التخطيط المكاني الإقليمي.

3.4.3 تصنيف الاستخدام الموجه إلى حوكمة الحيز الإقليمي

تحتاج إدارة الاستخدام بتكامل الجو والأرض أيضا إلى تحسين تصنيف الاستخدامات. فأنواع الحيز الإقليمي المختلفة تقابل أنشطة منخفضة الارتفاع وشدات تحكم مختلفة. تدعم أراضي البناء الحضري النقل الجوي الحضري المأهول ولوجستيات الطائرات المسيّرة عالية الشدة، كما تدعم التفتيش الحضري والإنقاذ الطارئ منخفض الشدة. وتدعم أراضي البناء الريفي اللوجستيات الريفية والسياحة

التجارية الريفية. وتدعم الأراضي الزراعية التفتيش الزراعي، وحماية المحاصيل، والرصد الديناميكي للمحاصيل. وتدعم الفضاءات البيئية دوريات الحماية البيئية، ورصد الغطاء النباتي، وحماية التنوع الحيوي، ورصد الكوارث أو البيئة المائية. وينبغي لنظام تصنيف الاستخدامات أن يجمع بين التنظيم الإداري، والتوجيه السوقي، والتمكين التقني، بحيث يربط شدة الإدارة بخصائص النشاط وحساسية استخدام الأرض الأدنى.

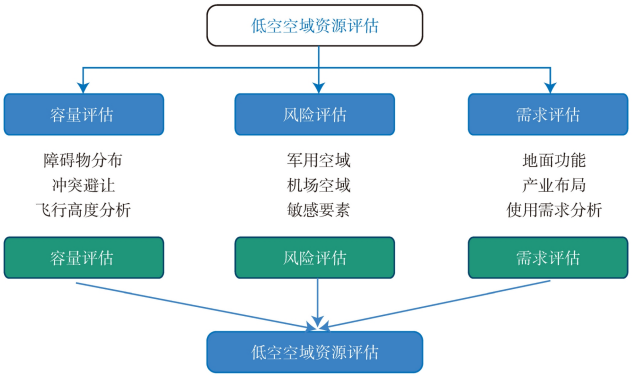
الجدول 3. مثال على العلاقة متعددة الأبعاد بين استخدامات الأرض الإقليمية وأنشطة الارتفاعات المنخفضة وشدة التحكم

نوع الحيز الإقليمي	نوع استخدام الأرض	النشاط النموذجي منخفض الارتفاع	شدة التحكم
الحيز الحضري	أراضي البناء الحضري	نقل ركاب بالنقل الجوي الحضري UAM	عالية
الحيز الحضري	أراضي البناء الحضري	لوجستيات الطائرات المسيّرة	عالية
الحيز الحضري	أراضي البناء الحضري	التفتيش الحضري والإنقاذ الطارئ	منخفضة
الحيز الحضري	أراضي البناء الحضري	السياحة منخفضة الارتفاع والتصوير الجوي التجاري	متوسطة
الحيز الريفي	أراضي البناء الريفي	اللوجستيات الريفية	متوسطة
الحيز الريفي	أراضي البناء الريفي	السياحة التجارية الريفية	متوسطة
الحيز الزراعي	الأراضي المزروعة	التفتيش الزراعي	منخفضة
الحيز الزراعي	الأراضي المزروعة	حماية المحاصيل في الحقول	منخفضة
الحيز الزراعي	الأراضي المزروعة	الرصد الديناميكي للمحاصيل	منخفضة
الحيز الزراعي	البساتين والغابات والمراعي وغيرها من أراضي الإنتاج الزراعي	تفتيش موارد الغابات	عالية
الحيز الزراعي	البساتين والغابات والمراعي وغيرها من أراضي الإنتاج الزراعي	دوريات الوقاية من الحرائق	متوسطة
الحيز الزراعي	البساتين والغابات والمراعي وغيرها من أراضي الإنتاج الزراعي	دوريات الحماية البيئية	متوسطة
الحيز البيئي	أراضي الحماية البيئية، بما في ذلك الأراضي الرطبة والمناطق المحمية والأراضي غير المستخدمة وغيرها من أراضي الوظيفة البيئية	الرصد الاعتيادي للغطاء النباتي	متوسطة
الحيز البيئي	أراضي الحماية البيئية	دوريات حماية التنوع الحيوي	متوسطة
الحيز البيئي	أراضي الحماية البيئية	الرصد الديناميكي للكوارث الجيولوجية والبيئة المائية	متوسطة

3.5 تحليل الحالة: ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع بتكامل الجو والأرض في جينان

3.5.1 منطقة الحالة وعملية التقييم

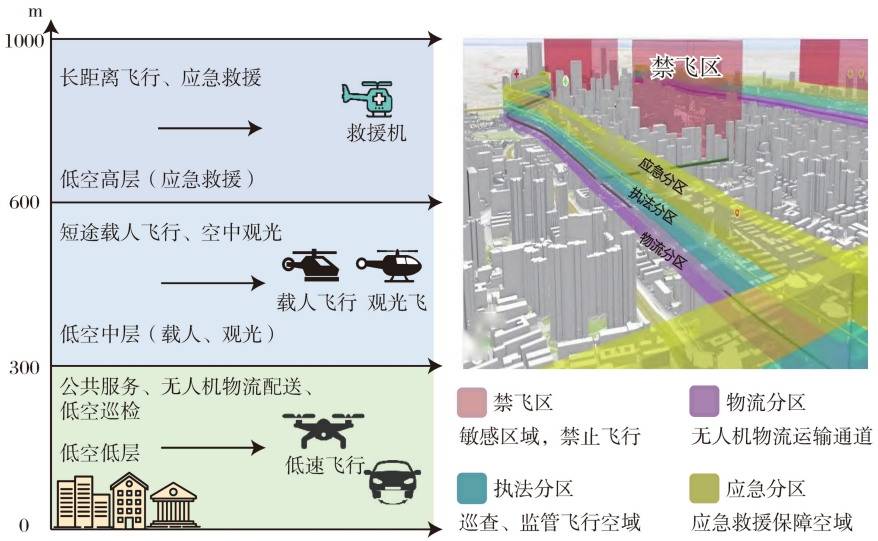
تطبق حالة جينان الإطار المقترح. وتبني منظومة لتقييم موارد المجال الجوي منخفض الارتفاع باستخدام بيانات متعددة المصادر، تشمل توزيع العوائق، والمجال العسكري، ومجال المطارات، والوظائف الأرضية، وتوزيع الصناعات، والعناصر الحساسة، والطلب التشغيلي. وينظم التقييم حول ثلاث طبقات معيارية: السعة، والمخاطر، والطلب. ويأخذ تقييم السعة في الاعتبار توزيع العوائق، وتجنب التعارض، وتحليل ارتفاع الطيران. ويأخذ تقييم المخاطر في الاعتبار المجالات العسكرية ومجالات المطارات والعناصر الحساسة وقيود السلامة. أما تقييم الطلب فينظر في الوظائف الأرضية، والتوزيع الصناعي، وطلب الاستخدام (الشكل 3).



الشكل 3. إطار توضيحي لتقييم موارد المجال الجوي منخفض الارتفاع

3.5.2 إدارة الاستخدام بالطبقات والمناطق والفترات الزمنية

في مرحلة التنفيذ، تجمع منطقة الحالة بين الطبقات الجوية والتقسيم الأرضي. رأسيا، يقسم المجال الجوي بحسب الارتفاع الحقيقي إلى طبقات 0-300 م، و300-600 م، و600-1000 م، بما يقابل الطيران منخفض السرعة، والطيران متوسط السرعة، وعمليات الطوارئ أو المسافات الأطول على مستوى أعلى. وعلى الأرض، تستخدم المناطق السياسية والعسكرية الحساسة، والمباني العالية، ومناطق مخاطر الكوارث الجيولوجية، والبنية الأساسية العامة، وغيرها من الفضاءات الخاضعة للضبط، بوصفها قيودا رئيسية. ثم تترجم نتائج تقييم الملاءمة إلى مناطق مناسبة، ومناسبة بشروط، ومقيدة، بما يحقق ترسيما جويا منسقا وضبطا أرضيا.



（a）低空空域分层　　（b）分区

الشكل 4. مخطط توضيحي لإدارة الاستخدام

وتدخل الحالة أيضا إدارة زمنية مقسمة. ففي فترات الذروة تشدد قيود الطيران وتعطى الأولوية للطيران الطارئ. وفي الفترات العادية تخفف القيود بدرجة مناسبة لضمان سلاسة ممرات الشحن والخدمات العامة. وفي فترات انخفاض الطلب يسمح بأنشطة طيران خاصة مثل لوجستيات الليل وتفتيش السلامة، مع ضبط صارم للضوضاء والتلوث الضوئي. ويتيح الجمع بين الطبقات والمناطق والفترات الزمنية استجابة أدق لتعقيد الطلب على أنشطة الارتفاعات المنخفضة.

3.5.3 قابلية الإطار للتطبيق والخبرة المستخلصة

تكمن الخبرة الأساسية لمنطقة الحالة في أنها طبقت أوليا عملية الترسيم المتكامل بين الجو والأرض ونظام الإدارة بالمناطق والتصنيفات الذي تقترحه الدراسة، مما حسّن جزئيا حدود الحوكمة التقليدية للمجال الجوي منخفض الارتفاع. فقد بنت الحالة سلسلة تقنية كاملة من دمج البيانات إلى التقييم الشامل ثم تنفيذ الترسيم. وبالاستناد إلى منصة «الخريطة الواحدة» للتخطيط المكاني الإقليمي، دمجت بيانات متعددة المصادر للجو والأرض وعالجت انفصال البيانات غير المتجانسة. كما استخدمت نموذجا كميا لمطابقة استخدام الأرض مع النشاط لتصنيف ملاءمة المجال الجوي في كامل المنطقة، وحولت نتائج التقييم إلى قيود متعددة للترسيم، بما يحقق انتقالا كاملا من البيانات إلى قواعد قابلة للتنفيذ.

ومن جانب الإدارة، كسرت التجربة أيضا حدود الضبط التقليدي أحادي البعد من خلال إدارة ثلاثية الأبعاد قائمة على الطبقات والمناطق والفترات الزمنية. وبالمقارنة مع القواعد التي تركز فقط على التقسيم الرأسي أو الحظر والتقييد الإقليمي، فإن مصفوفة الإدارة الناتجة عن ربط القواعد الثلاث أكثر ملاءمة للاحتياجات المعقدة لأنشطة الارتفاعات المنخفضة. لكن من منظور كامل النطاق وكامل العناصر، لا يزال النظام يعاني قصورا في تنسيق القواعد العابرة للحدود وفي دعم المناطق الريفية والمناطق الطبيعية المحمية وغيرها من الفضاءات غير الحضرية. وينبغي مستقبلا تحسين ربط القواعد عبر المناطق وبناء آلية ديناميكية وتدريجية لتعديل التخطيط، دعما لتنسيق أوسع لموارد الارتفاعات المنخفضة.

4 المناقشة والخلاصات

4.1 الخلاصات البحثية

تركز هذه الدراسة على ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع وإدارة استخدامه من منظور حوكمة الحيز الإقليمي على كامل النطاق وبكامل العناصر. وقد بنت إطارا منهجيا لتقنيات الترسيم وإدارة الاستخدام بتكامل الجو والأرض. وتؤكد الدراسة أن المجال الجوي منخفض الارتفاع تطور من مجرد «وسيط للطيران» إلى «مورد إقليمي ثلاثي الأبعاد» يتطلب تأكيدا ثلاثي الأبعاد للحقوق وتخصيصا دقيقا. أما جوهر التنسيق بين الجو والأرض فهو لعبة ثنائية الاتجاه وتوازن ديناميكي بين مصالح التطوير الأرضية ومصالح المرور الجوي.

وتتجاوز تقنية الترسيم القائمة على رسم خرائط المخاطر الأرضية، ونظام إدارة الاستخدام بالتقسيم والتصنيف والتدرج، حدود إدارة المجال الجوي التقليدية التي تركز على السماء وتغفل الأرض. كما توفر واجهة تقنية قابلة للتشغيل لإدراج المجال الجوي منخفض الارتفاع في «الخريطة الواحدة» للتخطيط المكاني الإقليمي. وتبين الحالة أن الإطار قادر على ربط البيانات والتقييم والترسيم والقواعد، وأن له جدوى عملية في تخصيص موارد الارتفاعات المنخفضة وحوكمتها.

4.2 توصيات السياسات

ينبغي إدماج ترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع وإدارة استخدامه في نظام التخطيط المكاني الإقليمي، وتعزيز ربطه بالتخطيط وتنفيذه. أولا، ينبغي تسريع صياغة معايير التخطيط المتخصص للبنية الأساسية الحضرية منخفضة الارتفاع والمتكاملة بين الجو والأرض. وينبغي لهذه المعايير أن توضح المؤشرات الرئيسية مثل تقسيم الارتفاعات المنخفضة وتوزيع المرافق، وأن تدرجها في وحدات التخطيط التفصيلي للحيز الإقليمي، وأن تترجمها إلى وحدات إدارة تخطيطية محددة ذات أساس قانوني للتنفيذ.

ثانيا، يجب تعزيز الربط الإداري. وينبغي لإدارات الموارد الطبيعية والطيران المدني وغيرها إنشاء آليات تعاون ومنصة موحدة لتشارك بيانات موارد الارتفاعات المنخفضة، ودمج البيانات متعددة المصادر، وفتح سلاسل الموافقة والرقابة بين الإدارات. ثالثا، ينبغي إدخال آلية احتياطي مرن في المناطق الحضرية المركزية وفق الخصائص المتغيرة لصناعات الارتفاعات المنخفضة. وينبغي تخطيط ممرات الخدمة العامة، ومحاور النقل، وممرات خدمة الإقلاع والهبوط العمودية مسبقا، مع توضيح العلاقة بين إدارة المجال الجوي وقيود البناء الأرضي، حتى لا تفقد موارد الارتفاعات المنخفضة بصورة دائمة. وأخيرا، ينبغي استخدام التوأم الرقمي، وGIS الذكي لكامل الفضاء، والتقنيات المرتبطة بها، لبناء حلقة تغذية راجعة ديناميكية من التخطيط والرصد والتقييم والإنذار المبكر. ويمكن لذلك أن يرصد تنفيذ التخطيط وديناميات الطيران في الزمن الحقيقي، ويدعم التقييم الدوري، ويرتبط بالتعديل الديناميكي للتخطيط المكاني الإقليمي، ويدفع حوكمة الارتفاعات المنخفضة من «مخطط ثابت» إلى «حوكمة ديناميكية».

4.3 الحدود والآفاق

تمثل هذه الدراسة استكشافا أوليا لترسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع، وإدارة استخدامه، وربطه بالتخطيط. وهي تقترح إطارا متكاملا للجو والأرض يوفر أفكارا للتخطيط والإدارة في مجال الارتفاعات المنخفضة، لكنها ما تزال محدودة من ناحيتين. فمن حيث البيانات، يصعب الحصول على نماذج حضرية ثلاثية الأبعاد دقيقة أعلى من مستوى LOD3، ولذلك يظل التحقق المجهري من تقنية الترسيم المقترحة في البيئات المبنية المعقدة غير كاف. ومن الناحية التقنية، يقوم الإطار أساسا على الشكل المكاني الفيزيائي الساكن، ولا يدمج بشكل كامل الآثار الآنية للحقول الجوية والفيزيائية الديناميكية، مثل حقول الرياح والبيئة الكهرومغناطيسية، في ترسيم المجال الجوي. لذلك لا يزال يفتقر إلى تحليل ديناميكي للاقتران المكاني بين الجو والأرض.

سيركز البحث المستقبلي على ترسيم شبكات المجال الجوي الديناميكية القائمة على الاستشعار الآني، وعلى نماذج كمية لتقييم قدرة المجال الجوي منخفض الارتفاع. ومن شأن ذلك أن يوفر دعما علميا أدق للتشغيل الكفء لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة.

المراجع

[1] لي شياوهوا. التوجيه الحكومي، وبناء النظام البيئي الصناعي، وتطور اقتصاد الارتفاعات المنخفضة. 2025 ،Reform(2): 21-35.

[2] دانغ آن رونغ، تشانغ تشاويانغ، وانغ فيفي، وآخرون. تقدم بحوث تخطيط البنية الأساسية منخفضة الارتفاع وآفاقها. Journal of Human Settlements in West China، 2025 ،40: 25-33.

[3] تشانغ هونغهاي، لي شان، يي جيا، وآخرون. مراجعة تخطيط المسارات الحضرية منخفضة الارتفاع. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics، 2021 ،53(6): 827-838.

[4] لياو شياوهان، هوانغ ياوهوان، شو تشنتشن. بحث في موارد المجال الجوي منخفض الارتفاع لتطبيقات الطائرات المسيّرة. Acta Geographica Sinica، 2021 ،76: 2607-2620.

[5] وانغ جيوو، وانغ يينينغ، تشانغ جونشن. استراتيجيات استجابة التخطيط لاستخدام المجال الجوي منخفض الارتفاع في ظل اقتصاد الارتفاعات المنخفضة. 2025 ،Planners، 41: 31-38.

[6] في يوهان، تشانغ هونغهاي، تشانغ لياندونغ، وآخرون. تخطيط مسارات نقل الطائرات المسيّرة للوجستيات الحضرية. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering)، 2023 ،47: 79-84.

[7] Uber. Fast-forwarding to a future of on-demand urban air transportation. 2016-10-27. https://evtol.news/__media/UE_WhitePaper_2016.pdf.

[8] ليو جياون، وانغ ليوينغ، شن تونغ، وآخرون. تطور اقتصاد الارتفاعات المنخفضة في الداخل والخارج وسيناريوهات تطبيقه في مجال السكك الحديدية. 2025 ،Railway Transport and Economy، 47: 30-43.

[9] جين ليشيا، لي شان، زنغ جيارونغ، وآخرون. التنمية الموجهة بالنقل منخفض الارتفاع (VOD): مقارنة دولية ومسار الصين. 2026 ،Urban Planning Forum(1): 73-80.

[10] وانغ جونتونغ، باو دانون، تشو جيايي، وآخرون. واقع بحوث تخطيط المجال الجوي منخفض الارتفاع وآفاقها. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica، 2025 ،46: 82-107.

[11] قاو تشيهونغ. البناء القانوني لإدارة المجال الجوي في اقتصاد الارتفاعات المنخفضة. 2025 ،China Law Review: 184-195.

[12] كونغ ديجيان، يوان زه. واقع نظام السياسات والقانون لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة وخبراته وآفاقه. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition)، 2024 ،37: 85-95.

[13] اللجنة المركزية للحزب الشيوعي الصيني ومجلس الدولة. آراء بشأن إنشاء نظام التخطيط المكاني الإقليمي والإشراف على تنفيذه. 23-05-2019. http://www.gov.cn/zhengce/2019-05/23/content_5394187.htm.

[14] يو هايتاو، لين جيان، بنغ تشنوي، وآخرون. حوار أكاديمي حول تحسين نظام ضبط استخدامات الحيز الإقليمي. Urban Planning Forum، 2023 ،(5): 1-11.

[15] Federal Aviation Administration. Small unmanned aircraft systems (UAS) regulations (Part 107). 06-10-2020. https://www.faa.gov/newsroom/small-unmanned-aircraft-systems-uas-regulations-part-107.

of 22 April 2021 on a European Commission. Commission Implementing Regulation (EU) 2021/664 [16]
-regulatory framework for the U-space. 2021-04-23. https://eur-lex.europa.eu/legal
.content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0664
.Finn R. L., Wright D. Unmanned aircraft systems: surveillance, ethics and privacy in civil applications [17]
.194-184 :(2)28 ،Computer Law & Security Review ،2012
[18] هوانغ جيان تشونغ، خه جياون، تشانغ ويتسونغ، وآخرون. التخطيط الحضري منخفض الارتفاع: عناصر التنسيق بين الأرض
والجو ومساراته واستجاباته التخطيطية. 2025 ،Urban Planning Forum(5): 14-22.
International Civil Aviation Organization. Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic [19]
.Management (PANS-ATM, Doc 4444). 16th ed. Montreal: ICAO, 2016
[20] تشيوان تشيوان، لي غانغ، باي ييتشين، وآخرون. عرض عام واقتراحات بشأن إدارة حركة الطائرات المسيّرة منخفضة الارتفاع.
.34-6 :(1)41 ،Acta Aeronautica et Astronautica Sinica ،2020
[21] تشن تشيجيه. التحديات التقنية التي تواجه تطور نظم مراقبة الحركة الجوية في المستقبل. Command Information
.5-1 :(6)7 ،System and Technology ،2016
[22] بي يونلونغ، تان ليبينغ، تو منغتشاو، وآخرون. التطور التاريخي والممارسة المحلية وبناء النظام لضبط استخدامات الحيز
الإقليمي. 2025 ،Planners، 41: 78-85.
[23] وانغ تشولين، تشن ويتشن. آلية ونمط حوكمة التخطيط المكاني الإقليمي من منظور نظرية «حق التحكم». Urban
.57-50 :(6)28 ،Development Studies ،2021
[24] المكتب العام لمجلس الدولة. آراء إرشادية بشأن تعزيز تطوير الطيران العام. 2016-05-13.
.http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/17/content_5074120.htm
[25] لين جيان، وو يوشيانغ، وو جيايو، وآخرون. في بناء نظام التخطيط المكاني: التخطيط المكاني، وضبط استخدامات الحيز
الإقليمي، والرقابة على الموارد الطبيعية. 2018 ،City Planning Review، 42(5): 9-17.
[26] تانغ شينمين، قو جونوي، ليو بينغ، وآخرون. مراجعة تقنيات الرصد منخفض الارتفاع واتجاهات تطورها. Journal of
.993-973 :56 ،Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ،2024
[27] فان تشه، يو فنغيوان، تشاو جيانبو. واقع واتجاهات تقنيات اختبار نظم الملاحة للطائرات منخفضة الارتفاع. Metrology &
.110-100 :45 ،Measurement Technology ،2025
[28] تشيوان زايشين، وو دينغجيه، قاو جياجينغ، وآخرون. مراجعة الحركة الجوية الحضرية منخفضة الارتفاع وتخطيط مسارات
.126-121 :(4)54 ،Aeronautical Computing Technique ،2024 الطائرات المسيّرة.
Kopardekar P., Rios J., Prevot T., et al. Unmanned aircraft system traffic management (UTM) [29]
.concept of operations. 2016-06-13. https://ntrs.nasa.gov/citations/20160003003
.SESAR Joint Undertaking. U-space concept of operations (CONOPS). 2019-09-30 [30]
.https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/u-space/CORUS%20ConOps%20vol2.pdf
[31] تشو يونغون، تشن تشيجيه، بو فان، وآخرون. قضايا علمية وتقنية في الإدارة الذكية للحركة الجوية. Strategic Study of
.184-174 :25 ،CAE ،2023
[32] جيا يونغنان. استكشاف أولي لخطط إدارة حركة الأنظمة غير المأهولة في المجال الجوي منخفض الارتفاع. Acta
.147-121 :46 ،Aeronautica et Astronautica Sinica ،2025
Dorling K., Heinrichs J., Messier G. G., et al. Vehicle routing problems for drone delivery. IEEE [33]
.85-70 :(1)47 ،Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems ،2017
[34] تشن شياو، ماو يهبينغ. واقع وآفاق تطبيق تقنية ADS-B في سلامة المجال الجوي منخفض الارتفاع. Electronic
.67-61 :(20)45 ،Measurement Technology ،2022
[35] تساي مينغ، ما تشوانتشي، تشو هواسا، وآخرون. مراجعة تقنيات دعم السلامة لعمليات الارتفاعات المنخفضة. Journal of
.26-1 :23 ،Transportation Engineering and Information ،2025

[36] شي تشونهوي، ليو زه، يو شياو، وآخرون. ضبط استخدام المجال الجوي منخفض الارتفاع على أساس حقوق تطوير الارتفاعات المنخفضة: الواقع والنظرية والنظام المؤسسي. Urban Planning Forum، 2026(1): 65-72.
[37] ليو تشيوان، تشن ياوياو، هونغ شياوي، وآخرون. الخبرة الدولية في تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع للطائرات المسيّرة. Urban Planning Forum، 2024(5): 64-70.
[38] ني هونغفو، وانغ شياوشينغ. المنطق الاقتصادي لإدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع. Southeast Academic Research، 2025(4): 175-187.
[39] وانغ جياوه، دو دلين. تفسير جغرافي لاقتصاد الارتفاعات المنخفضة وتحليل نظري لنظم الإنسان والأرض منخفضة الارتفاع. Resources Science، 2025، 47: 1628-1639.
[40] Public-Private Committee for Advanced Air Mobility. Concept of operations for advanced air mobility. 2023-12-06. https://www.aero.jaxa.jp/eng/research/star/concerto/.
[41] European Union Aviation Safety Agency. Study on the societal acceptance of urban air mobility in Europe. 2021-05-19. https://trid.trb.org/View/1869021.
[42] Transport Canada. Aeronautical Information Manual (TC AIM). 2025-10-02. https://tc.canada.ca/en/aviation/publications/aeronautical-information-manual-aim.
[43] Civil Aviation Safety Authority. Civil Aviation Safety Regulations 1998. 29-11-2024. https://www.legislation.gov.au/F2024L01553/asmade/2024-11-29.
[44] United Kingdom Civil Aviation Authority. The Air Navigation Order 2016. 13-07-2016. https://www.legislation.gov.uk/uksi/2016/765/contents.
[45] فنغ مينغشيانغ، لي هايجون، يان في، وآخرون. طريقة تحديد وحساب مناطق تقييد الطيران الحضري منخفض الارتفاع عبر دمج بيانات متعددة المصادر. Urban Planning Forum، 2025(ملحق 2): 146-153.
[46] شيا هاو، لين يويه وي، يان جون، وآخرون. مراجعة التقنيات الرئيسية للاتصال والاستشعار المتكاملين في الطائرات المسيّرة منخفضة الارتفاع. Telecommunication Engineering، 2025، 65(6): 838-847.

ترجمة بمساعدة الذكاء الاصطناعي