التجارب الدولية في تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع للطائرات المسيّرة

LIU Quan, CHEN Yaoyao, HONG Xiaowei, LI Hao, QIAN Zhenghan

الملخص. أصبح تطور اقتصاد الارتفاعات المنخفضة والتنقل الجوي الحضري من الموضوعات البارزة، بالتزامن مع الانتشار التدريجي لأنشطة مثل الخدمات اللوجستية السريعة بالطائرات المسيّرة داخل المدن. ومن شأن هذه التحولات أن تعيد تشكيل بنية المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع، وأن تؤثر في سلامته وكفاءته وسعته، فضلا عن إحداث تأثير واسع في شكل الفضاء الحضري واستخدامه وإدارته.

ولن يظل التطور ثلاثي الأبعاد لمدن المستقبل محصورا في سطح الأرض والفضاء المبني وتحت الأرض، بل سيمتد إلى المجال الجوي منخفض الارتفاع لتكوين بنية مكانية أكثر اكتمالا. ويطرح هذا الاتجاه تحولات ومسائل جديدة أمام التخطيط الحضري. لذلك، من الضروري تحليل آثار تطور الطائرات المسيّرة انطلاقا من العلاقة بين المجال الجوي والفضاء الحضري، وتلخيص الخبرات الدولية، وإجراء مراجعة منهجية لطرائق تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع الموجهة للطائرات المسيّرة، بما يوفر مرجعا مفيدا لتجديد التخطيط الحضري في الصين.

الكلمات المفتاحية: المدينة الذكية؛ اقتصاد الارتفاعات المنخفضة؛ الطائرات المسيّرة؛ الفضاء الحضري؛ المجال الجوي؛ المدينة ثلاثية الأبعاد؛ التخطيط الحضري.

تصنيف المكتبة الصينية: TU984

رمز الوثيقة: A

DOI: 10.16361/j.upf.202405009

رقم المقال:

1000-3363 (2024) 05-0064-07

1 تطور المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع للطائرات المسيّرة وآثاره المكانية

لطالما ظهر امتلاء سماء المدينة بالمركبات الطائرة بوصفه إحدى الصور الرئيسة في تصورات مدن المستقبل، فيما عُدّت السيارة الطائرة من أبرز سمات المدينة التكنولوجية [1]. ومن أمثلة ذلك التصور الذي نشرته صحيفة Boston Globe عام 1900 عن المناطيد فوق المدن [2]، والرسوم المتعلقة بالمركبات الطائرة في «المدينة المعاصرة» للمعماري لو كوربوزييه ومدينة Broadacre City لفرانك لويد رايت خلال ثلاثينيات وأربعينيات القرن العشرين [3]، فضلا عن نموذج AOD (air-mobility oriented development) الذي اقترحه مختبر NIKKEN Future Lab التابع لشركة Nikken Sekkei عام 2023، ويجمع بين الطائرات المسيّرة والسيارات الطائرة في تصميم مدينة المستقبل [4]. أما في الواقع، فقد أصبحت تقنيات المركبات الجوية غير المأهولة (UAV, drones) والطائرات الكهربائية ذات الإقلاع والهبوط العمودي (eVTOL) أكثر نضجا، وبدأت تترك آثارا عملية في المجال الجوي والفضاء الحضري.

في الصين، يؤدي تطور تقنيات الطيران منخفض الارتفاع إلى تحولات جديدة في المجال الجوي الحضري وإلى نمو سريع في اقتصاد الارتفاعات المنخفضة①. ففي عام 2021 أصدر كل من اللجنة المركزية للحزب الشيوعي الصيني ومجلس الدولة «المخطط الوطني لشبكة النقل المتكاملة ثلاثية الأبعاد»، الذي أدرج لأول مرة مفهوم «اقتصاد الارتفاعات المنخفضة» في وثيقة وطنية للتخطيط. وفي عام 2023 ازداد الاهتمام بهذا الاقتصاد بوصفه قطاعا ناشئا واعدا بقيمة قد تبلغ تريليونات اليوانات.

ومن منظور التخطيط والبناء الحضريين، تعمل معظم المركبات الجوية المستخدمة داخل المدن في المجال الجوي منخفض الارتفاع. وبالمقارنة مع طائرات الطيران العام التي تحلق على ارتفاعات أعلى، ترتبط هذه المركبات بصورة أوثق بأنشطة السكان اليومية وتقع على مسافة أقرب من البيئة المبنية. كما بدأت خدمات التوصيل واللوجستيات بالطائرات المسيّرة بالانتشار تدريجيا في المدن، بما يغير مستويات السلامة والكفاءة والسعة في المجال الجوي منخفض الارتفاع، ويؤثر بعمق في شكل الفضاء الحضري واستخدامه وإدارته.

خلال مرحلة التخطيط الحضري الحديث، عُدّ استخدام السيارة قضية محورية في العلاقة بين استعمالات الأرض والنقل [5]. ومثلما غيّر اختراع السيارة مسار التخطيط الحضري الحديث، وتؤثر تقنيات المركبات ذاتية القيادة اليوم في نظام النقل الحضري [6]، قد يؤدي تطور اقتصاد الارتفاعات المنخفضة ونضج تقنيات الطائرات المسيّرة إلى إعادة تشكيل مورفولوجيا الفضاء الحضري في مرحلة المدن الذكية.

وفي ظل التطور السريع لتقنيات الطائرات المسيّرة، لن يقتصر البناء ثلاثي الأبعاد لمدينة المستقبل على ثلاثة مستويات هي سطح الأرض والفضاء المبني وتحت الأرض، بل سيشمل مستوى رابعا هو المجال الجوي منخفض الارتفاع. وعلى خلاف طائرات eVTOL التي تعمل في الغالب فوق ارتفاع 120 م، تحلق الطائرات المسيّرة عادة تحت هذا الارتفاع [7]، أي على مسافة أقرب من سطح الأرض. ولذلك قد تكون أكثر العناصر تأثيرا بصورة مباشرة في العلاقة بين الفضاء الأرضي والمجال الجوي منخفض الارتفاع ضمن تخطيط المدن الذكية.

ومن ثم يلزم تحليل دلالات تطور الطائرات المسيّرة انطلاقا من العلاقة بين المجال الجوي والفضاء الحضري، وتلخيص الخبرات المحلية والدولية، وإجراء مراجعة لطرائق تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع الموجهة للطائرات المسيّرة②، بما يقدم مرجعا لتجديد إدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع والتخطيط المكاني الحضري في الصين.

2 المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع

2.1 تحديد المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع

مع تطور اقتصاد الارتفاعات المنخفضة، أصبح التنقل الجوي الحضري (urban air mobility, UAM) اتجاها مهما. وتستخدم الطائرات المسيّرة في النقل، ومكافحة الحرائق، والوقاية من الكوارث، والمسح ورسم الخرائط وغيرها من الوظائف، وأصبحت مجالا ذا أولوية في دول عديدة. ويؤدي انتشارها حتما إلى تغير طرائق استخدام المجال الجوي.

يرتبط مفهوم «المجال الجوي» ارتباطا وثيقا بالمركبات الجوية، ويشير عادة إلى حيز الهواء الواقع فوق سطح الأرض والمتاح للطيران. ووفقا لخدمات الحركة الجوية ومتطلبات الطيران التي تحددها منظمة الطيران المدني الدولي (ICAO)، يُقسم المجال الجوي إلى مجال مراقب وآخر غير مراقب، ويشمل سبع فئات تمتد من A إلى G. وتعد الفئات A-E مراقبة، بينما تقع الفئتان F, G ضمن المجال غير المراقب [8].

يُقصد بالمجال الجوي منخفض الارتفاع، من حيث المبدأ، المجال الواقع على ارتفاع حقيقي لا يتجاوز 1000 م [9]. أما المجال شديد الانخفاض فيُقصد به عادة الارتفاع الحقيقي الذي لا يتجاوز 120 م، وينتمي إلى الفئة G غير المراقبة③. ووفقا لإحصاءات الربع الأول من عام 2019 الصادرة عن إدارة الطيران المدني الصينية، عمل 96.5% من الطائرات المسيّرة تحت الحد الأعلى للمجال شديد الانخفاض، و99.9% تحت الحد الأعلى للمجال منخفض الارتفاع. ومن ثم يرتبط هذا المجال ارتباطا مباشرا بتشغيل الطائرات المسيّرة.

وتنص «اللائحة المؤقتة لإدارة رحلات الطائرات غير المأهولة»، التي نشرتها الصين عام 2024، على أن المجال المناسب لطيران الطائرات المسيّرة هو المجال الواقع تحت 120 م، في حين يُعد المجال فوق هذا الارتفاع مجالا مراقبا [10]④. لذلك تركز الدراسة على المجال الحضري الواقع تحت 120 م، والذي تستخدمه أساسا فئتان: الطائرات المسيّرة الاستهلاكية والطائرات الصغيرة المخصصة للنقل والخدمات اللوجستية.

يعني تزايد استخدام الطائرات المسيّرة زيادة إشغال المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع، وهو ما يثير مسألة إدارته [11]. وقد ظل هذا الجزء من المجال الجوي مهملا نسبيا في إدارة الطيران والتخطيط الحضري، لكنه بات مكونا مهما في تطور المدن الذكية، وفي الوقت نفسه مجالا محتملا لمشكلات الإدارة. ويشير Paul Cureton إلى أن التنقل الجوي الحضري يملأ «حيزا فارغا» (void space) كان قليل الاستخدام بين الطيران التقليدي وسطح الأرض [2].

2.2 العلاقة بين المجال الجوي والفضاء الحضري والمشكلات المرتبطة بها

نظرا إلى وقوع المجال الجوي منخفض الارتفاع داخل النطاق الحضري، فإنه يرتبط مباشرة بمفهوم الفضاء الحضري. ومن أجل تحديده، ينبغي التمييز بين هذين المفهومين الرئيسين. ففي المدينة، يحظى الفضاء والحقوق المكانية باهتمام واسع، وتتمتع أوصافهما وأوضاعهما القانونية بقدر نسبي من الوضوح. أما القوانين الصينية القائمة فلا تحدد بدقة مضمون مفهوم المجال الجوي [12]، كما أن تعريف حقوقه لا يزال غير كاف [13 ،9].

وتكمن الصعوبة في أن المجال الجوي لا يمكن وصفه من منظور عام مفرط الاتساع، بل يشير تحديدا إلى الحيز الذي تستطيع المركبة الجوية أن تطير فيه بأمان من الناحية النظرية [9]. ولا يزال التمييز، من منظور التخطيط الحضري، بين المجال الجوي منخفض الارتفاع والفضاء فوق الأرض غير واضح على نحو كاف.

يؤثر تشغيل الطائرات المسيّرة في المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع بصورة مباشرة في البيئة المبنية على سطح الأرض، ويغير العلاقة عند الحد الفاصل بين المركبات الجوية والمدينة. وتشمل هذه العلاقة نقل الركاب، والإمدادات الطبية، والشحن السريع، وخدمات الطوارئ، وصيانة البنية التحتية [11]. ومع زيادة عدد الطائرات المسيّرة، تتأكد صفة المجال الجوي بوصفه موردا مكانيا. وبما أن اللوائح لا تحدد دائما ارتفاعا أدنى للنشاط، تنشأ في المجال القريب من الأرض حالة تداخل بين حقوق المجال الجوي والحقوق المكانية. وقد أدى استخدام الطائرات المسيّرة في المدينة إلى «كسر الحزام العازل الذي كان يفصل في عصر الطيران المأهول بين حقوق المجال الجوي والحقوق القائمة على الأرض» [13]. ومن المتوقع أن تزداد صعوبة إدارة المجالين الجوي والحضري مع ارتفاع كثافة الحركة [10].

2.3 مضمون تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع

يرتبط تخطيط المجال الجوي ارتباطا وثيقا بإدارة الحركة الجوية ومراقبتها. وهو يعني التنظيم الاستراتيجي لنمط إدارة الحركة وتخصيص موارد المجال الجوي، بهدف ضمان السلامة والكفاءة [14]. ويشمل تخطيط مجال الطيران العام حاليا تصميم الإجراءات،

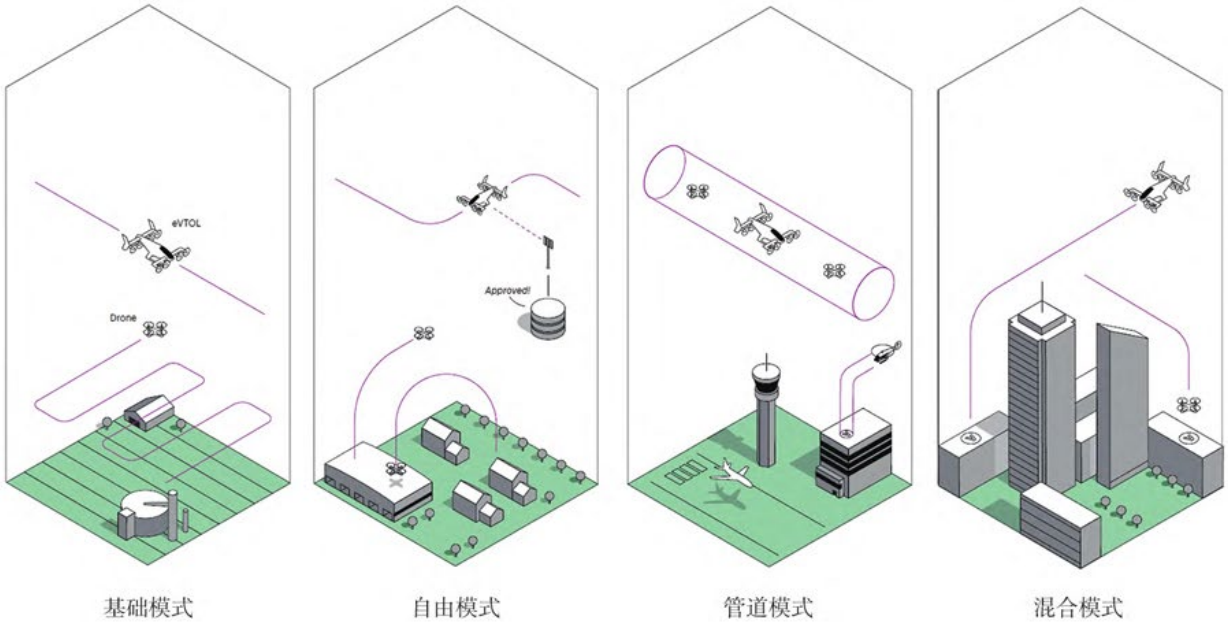
وتخطيط بنية المجال الجوي، وتحديد مسؤوليات تقديم خدمات الحركة الجوية، وتصنيف مجالات الخدمة الجوية [15]. غير أن تطوير المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع واستخدامه لا يزالان في مرحلة استكشافية مبكرة، ولم يصلا بعد إلى مستوى النضج الذي بلغه تخطيط مجال الطيران العام.

ويرى Zhang Honghai وآخرون [16] وLi Chenglong وآخرون [17] أن تخطيط المجال الجوي ينبغي أن يشمل ثلاثة جوانب: التقسيم، والبنية، والسعة. وفي المرحلة الحالية، يعتمد الطيران غير المأهول أساسا على تجارب تشغيلية نموذجية في بيئات وسيناريوهات محددة، ولذلك يركز التخطيط على رسم مسارات بعينها. أما في مرحلة النضج، ومع الارتفاع الكبير في كثافة الحركة، فسيصبح التقسيم والبنية محورين رئيسين، بينما تتولى أنظمة التخطيط الآلي للرحلات تصميم مسارات تحقق السلامة والعدالة والكفاءة لكل طائرة مسيّرة [18].

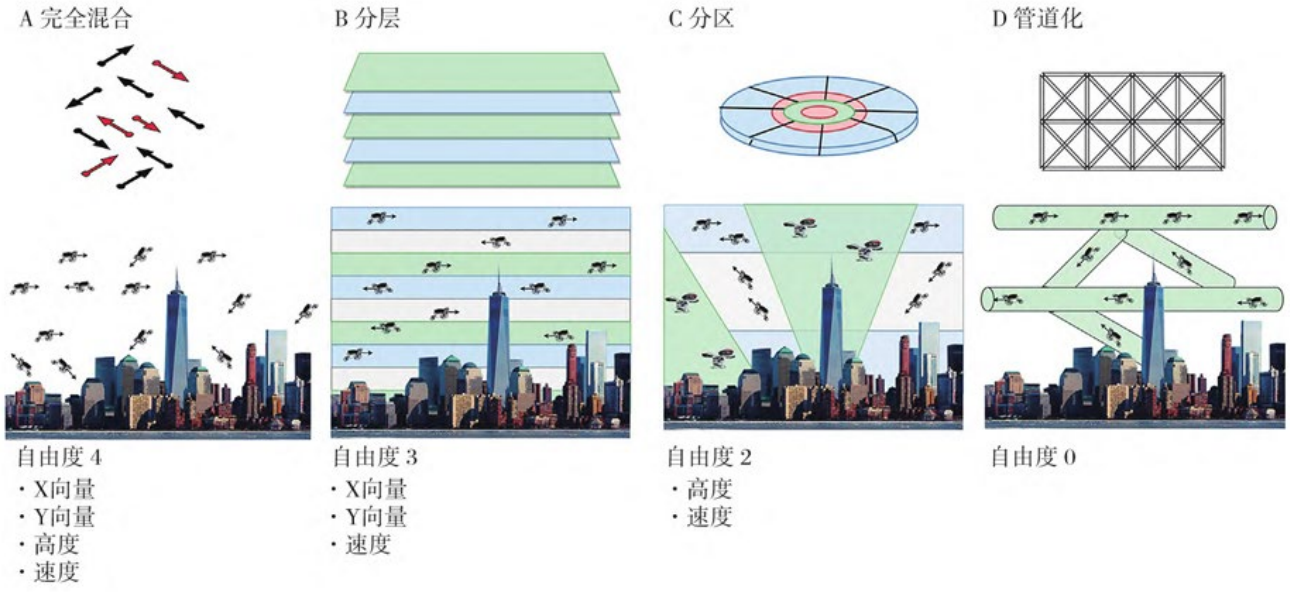
3 مراجعة الخبرات الدولية في تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع

يرتبط تصميم بنية المجال الجوي الحضري ارتباطا وثيقا بأنماط طيران الطائرات المسيّرة. ووفقا لمخطط شركة Airbus، يمكن التمييز بين أربعة أنماط: الطيران الأساسي (basic flight)، والمسار الحر (free route)، والممر (corridor)، والمسار المختلط (mixed route). ويمثل النمط الأساسي حالة الطيران المعتادة؛ ويسمح المسار الحر باستخدام أي مسار مع تنسيق حركة المركبات الأخرى ومنع التعارض؛ أما الممر فهو حيز محدد لإدارة مناطق الطلب المرتفع أو التدفقات المركزة؛ ويجمع النمط المختلط بين المسارات الثابتة والمنشآت المرتبطة بها في المناطق ذات الكثافة العالية أو حيث تتطلب السلامة تنظيما هيكليا [19] (الشكل 1).

وبالنظر إلى خصائص الطيران، يمكن تنظيم المجال الجوي الحضري وفق أربعة أنماط أساسية: المزج الكامل، والتقسيم الطبقي، والتقسيم المكاني، والتنظيم بالممرات. وتختلف هذه الأنماط في درجات الحرية المتعلقة بالاتجاه والارتفاع والسرعة [20-21] (الشكل 2). وتتناول المراجعة التالية ثلاثة محاور: تقسيم المجال الجوي، وبنيته، وسعته.



الشكل 1. أربعة أنماط لطيران الطائرات المسيّرة [19]



الشكل 2. أربعة مفاهيم لبنية المجال الجوي [21]

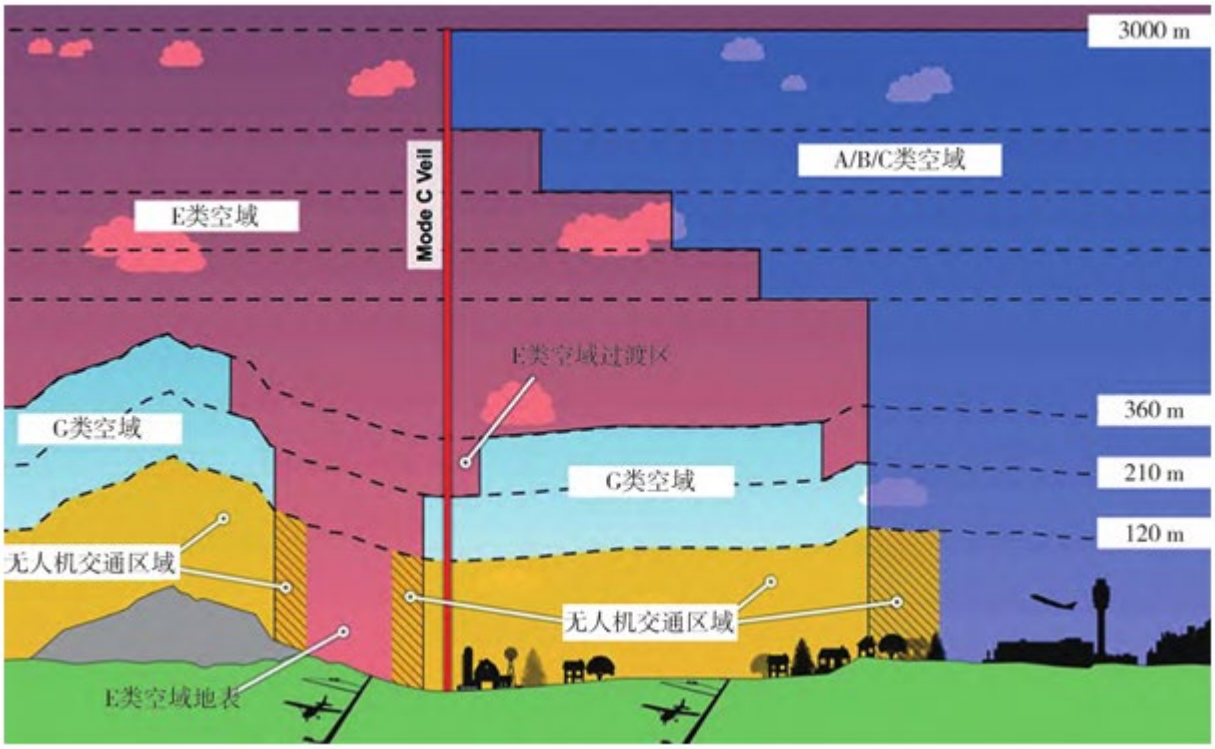
3.1 تقسيم المجال الجوي منخفض الارتفاع إلى طبقات ومناطق

بدأت بعض الدول والمدن والمؤسسات دراسة الإدارة الطبقية والمناطقية للمجال الجوي منخفض الارتفاع وتجريبها. ففي الولايات المتحدة، تعتبر إدارة الطيران الفيدرالية (FAA)، استنادا إلى تصنيف ICAO، المجال غير المراقب الواقع بين سطح الأرض وارتفاع 120 م مجالا مناسبا للطائرات المسيّرة الصغيرة. ويسعى برنامج إدارة حركة الطائرات المسيّرة لدى FAA وNASA إلى دمج عملياتها مع فئات المجال الجوي الأخرى عبر إنشاء مناطق انتقالية تحجز حيزا للطائرات المسيّرة وتفصلها عن الحركة الجوية المراقبة [8] (الشكل 3).

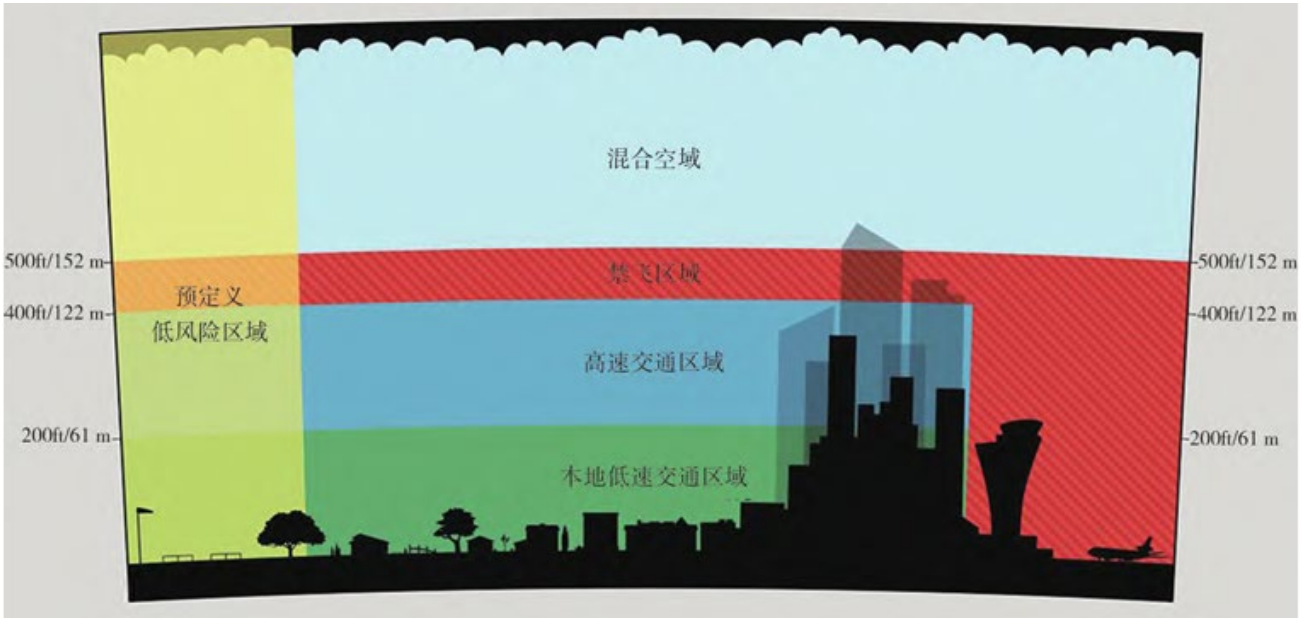
يرتبط التقسيم المكاني ارتباطا وثيقا بوظائف الطيران واستعمالات الأرض. وينبغي تحديد مناطق الإقلاع والهبوط والمناطق المحظورة وإدارتها بصورة مستقلة. كما تختلف متطلبات الطيران ومخاطره بين مراكز المدن والمناطق العادية والأرياف والمناطق المحيطة بالمطارات. أما التقسيم الطبقي فينبغي أن يستجيب للخصائص التقنية الحالية للطائرات المسيّرة.

وتقترح Amazon، على سبيل المثال، تقسيم المجال الحضري منخفض الارتفاع إلى عدة طبقات: تحت 60 م، منطقة محلية بطيئة للحركة مخصصة للقياس والتصوير والتفتيش وغيرها من الأنشطة الطرفية غير النقلية، وللمركبات الأقل تقدما تقنيا؛ وبين 60 و120 م، منطقة حركة سريعة للمركبات الأعلى تطورا؛ وبين 120 و150 م، منطقة حظر تستخدم عازلا؛ وخارج المدينة، منطقة منخفضة المخاطر محددة مسبقا [22] (الشكل 4).

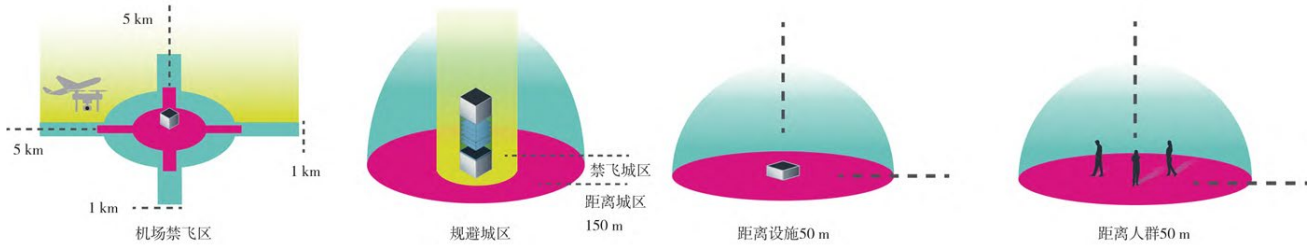
كما ينبغي أن يراعي التقسيم مخاطر الطيران والأشخاص والأشياء التي يجب تجنبها. وبالنسبة إلى الطائرات المسيّرة الاستهلاكية المستخدمة للترفيه، تحظر FAA التحليق فوق تجمعات الناس وتدفقات المركبات والطيران الليلي [23]. وتبين مراجعة قيود السياج الجغرافي في دول مختلفة أن مسافات الابتعاد عن الأشخاص والممتلكات والمناطق المزدحمة والمباني والبنية التحتية تتراوح بين ٣٠ مترا و٥ كيلومترات [24]. ويلخص Cureton [3] أربعة مبادئ: الابتعاد عن منشآت الطيران، ولا سيما المطارات؛ والحفاظ على مسافة تزيد على ١٥٠ مترا من المناطق الحضرية المحظور التحليق فوقها؛ والابتعاد ٥٠ مترا على الأقل عن بعض المنشآت؛ والحفاظ على مسافة ٥٠ مترا على الأقل من تجمعات الناس (الشكل 5). وتقترح دراستان أخريان [25] و[26] مناطق حماية بنصف قطر يتراوح من ١٠ إلى ٦٠ مترا للإقلاع والهبوط والطيران.



الشكل 3. مناطق تشغيل الطائرات المسيّرة في نظام تقسيم المجال الجوي الأمريكي [8]



الشكل 4. مقترح Amazon لتقسيم مجال الطائرات المسيّرة إلى طبقات ومناطق [22]

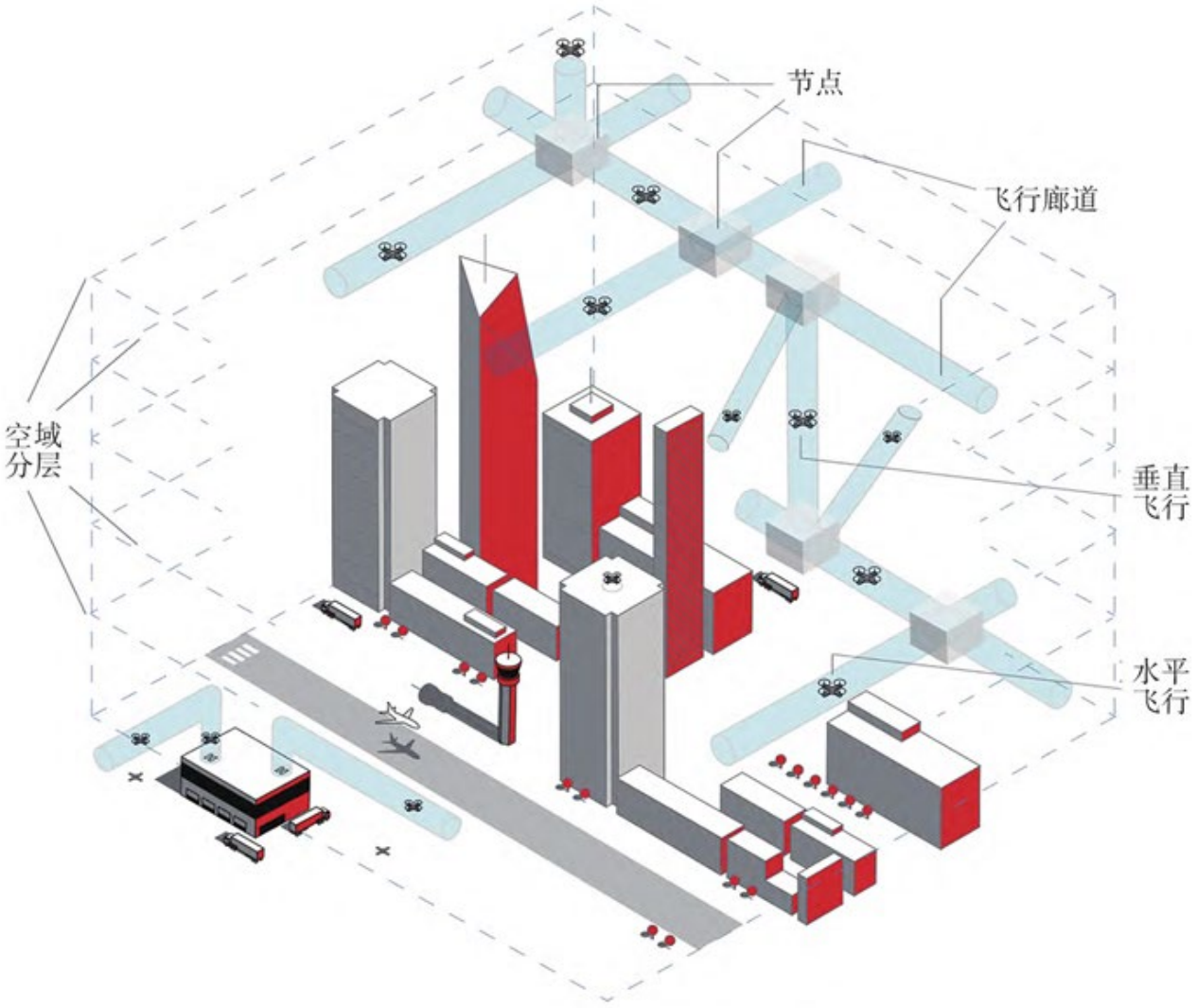


الشكل 5. الأشخاص والأشياء التي ينبغي للطائرات المسيّرة تجنبها [3]

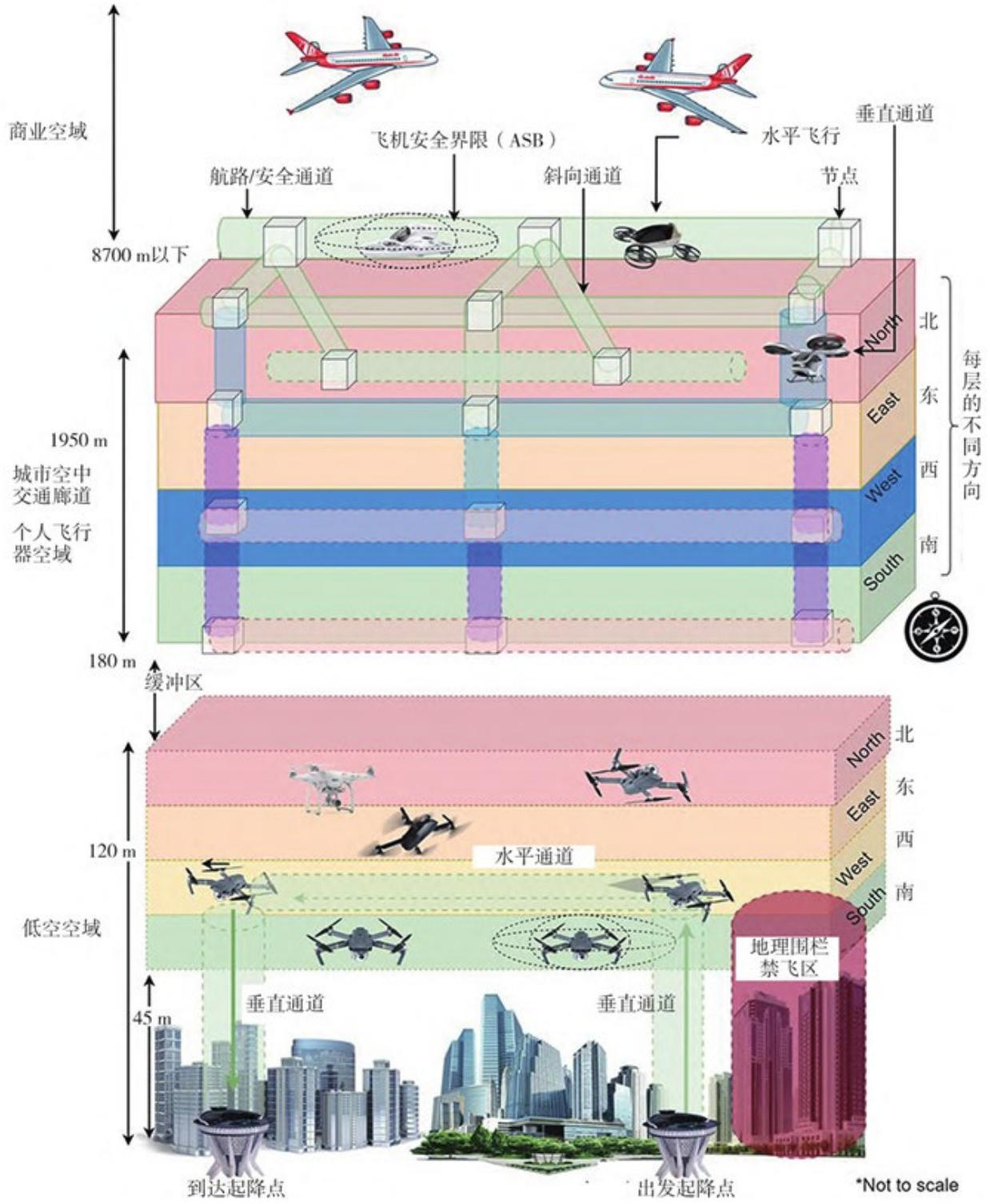
3.2 تصميم بنية المجال الجوي منخفض الارتفاع

مع زيادة عدد الطائرات المسيّرة، يحتاج المجال الجوي منخفض الارتفاع إلى بنية حركة أكثر دقة لتحسين الكفاءة وضمان السلامة. وتقترح NASA بنية حضرية متعددة المستويات، بحيث تضم كل طبقة تنظيما جويا فوق المدينة وتشكل شبكة بين المباني العالية والكثيفة. وتشمل هذه الشبكة المسارات الجوية (sky-lane)، والأنابيب الجوية (sky-tube)، والممرات الجوية (sky-corridor)، التي تختلف في درجات الحرية. وتفرض المسارات الجوية أشد القيود على الارتفاع والاتجاه والسرعة والموقع، بينما تسمح الممرات الجوية بأكبر قدر من الحرية [8]. ويمكن لبنية المجال الحضري أن تستند إلى نموذج الفئة G الموضح في الشكل 6، وأن تشمل التقسيم الطبقي والممرات الأفقية والرأسية والمائلة [27].

يدرس Rakesh Shrestha وآخرون بنية المجال الجوي من منظور اتصالات الجيل السادس عالية السرعة. ويقترحون تنظيما طبقيا ونظام ممرات تتصل بعقد عند نقاط التقاطع داخل الطبقات وفيما بينها أفقيا ورأسيا وقطريا. وتعمل المسارات الجوية على توجيه حركة الطائرات المسيّرة. ويُحدد مقطع المسار وفقا للخصائص التقنية للمركبات، بينما يتوقف طوله على وجود العوائق الثابتة والتقاطعات والعقد على الطريق [28] (الشكل 7).



الشكل 6. تصميم بنية مجال جوي من الفئة G [27]



الشكل 7. نموذج بنية المجال الجوي الذي اقترحه Shrestha وآخرون [28]

3.3 تقييم سعة المجال الجوي منخفض الارتفاع وتخطيطها

تشير سعة المجال الجوي، من حيث المبدأ، إلى العدد الأقصى من المركبات الجوية التي يمكن استقبالها في وحدة زمنية ضمن بيئة محددة. وتنتج البنى المختلفة سعات متفاوتة. وبالمقارنة مع المجال الجوي المرتفع المراقب، الذي يكاد يخلو من العوائق الثابتة، تتسم البيئة الحضرية منخفضة الارتفاع بتعقيد أكبر بكثير [29]. فالتنظيم المكاني للمدينة وكثافة البناء وخصائص البيئة شديدة التنوع، وليس من

النادر وجود مبان يتجاوز ارتفاعها 100 م بل عدة مئات من الأمتار. وعندما يُحدد سقف تحليق الطائرات المسيّرة عند 120 م، يصبح من الضروري أن تراعي المسارات تلك المنشآت والبيئة المحيطة بها.

ولهذا تستند البحوث والتجارب التطبيقية عادة إلى مورفولوجيا البناء الحضري عند تصميم بنية المجال منخفض الارتفاع وإدارته. وتؤكد الحاجة إلى تقييم السعة مع مراعاة تعقيد البيئة، وأداء المركبات الجوية، وسيناريوهات الاستخدام [30]. وقد اقترحت جامعة دلفت للتكنولوجيا مفهوم «التوجيه الجغرافي» (geovectoring)، الذي يرفع السعة عبر خفض تعقيد حركة الطائرات المسيّرة [20]. وتستخدم جامعة نانيانغ للتكنولوجيا في سنغافورة مؤشرين لقياس شبكات المسارات الجوية الحضرية، هما السعة ومعدل التدفق. كما تميز NASA بين فترات كثافة منخفضة ومتوسطة وعالية، وتستخلص مسارات تقنية لزيادة سعة المجال الجوي الحضري [17].

ويرتبط التحكم في السعة كذلك بسلامة الطيران. فمن أجل خفض مخاطر التصادم، ينبغي للتخطيط أن يحدد الكثافة القصوى للطائرات المسيّرة في الساعة عند الارتفاعات المختلفة [31]. ويمكن استخدام حلول حصرية مؤقتة، مثل توسيع المجال المراقب أو إنشاء مجال معزول.

4 تأملات استشرافية في طرائق تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع

المجال الجوي منخفض الارتفاع مورد مكاني غير قابل للنقل، وتظهر قيمته ارتباطا واضحا بالموقع. فكلما ارتفعت كثافة السكان زاد الطلب على استخدامه، بينما ينخفض الطلب في المناطق النائية، فتتشكل فروق في القيمة [32]. ومع تطور التقنيات والاستخدام الواسع للمركبات الجوية، سيزداد الضغط على المجال الحضري منخفض الارتفاع، ما سيؤدي حتما إلى تقسيمه وإعادة ترسيمه بدرجة أكثر تفصيلا، ويدفع إلى إعادة تشكيل الفضاء الحضري بما يدمج الوظائف الجوية.

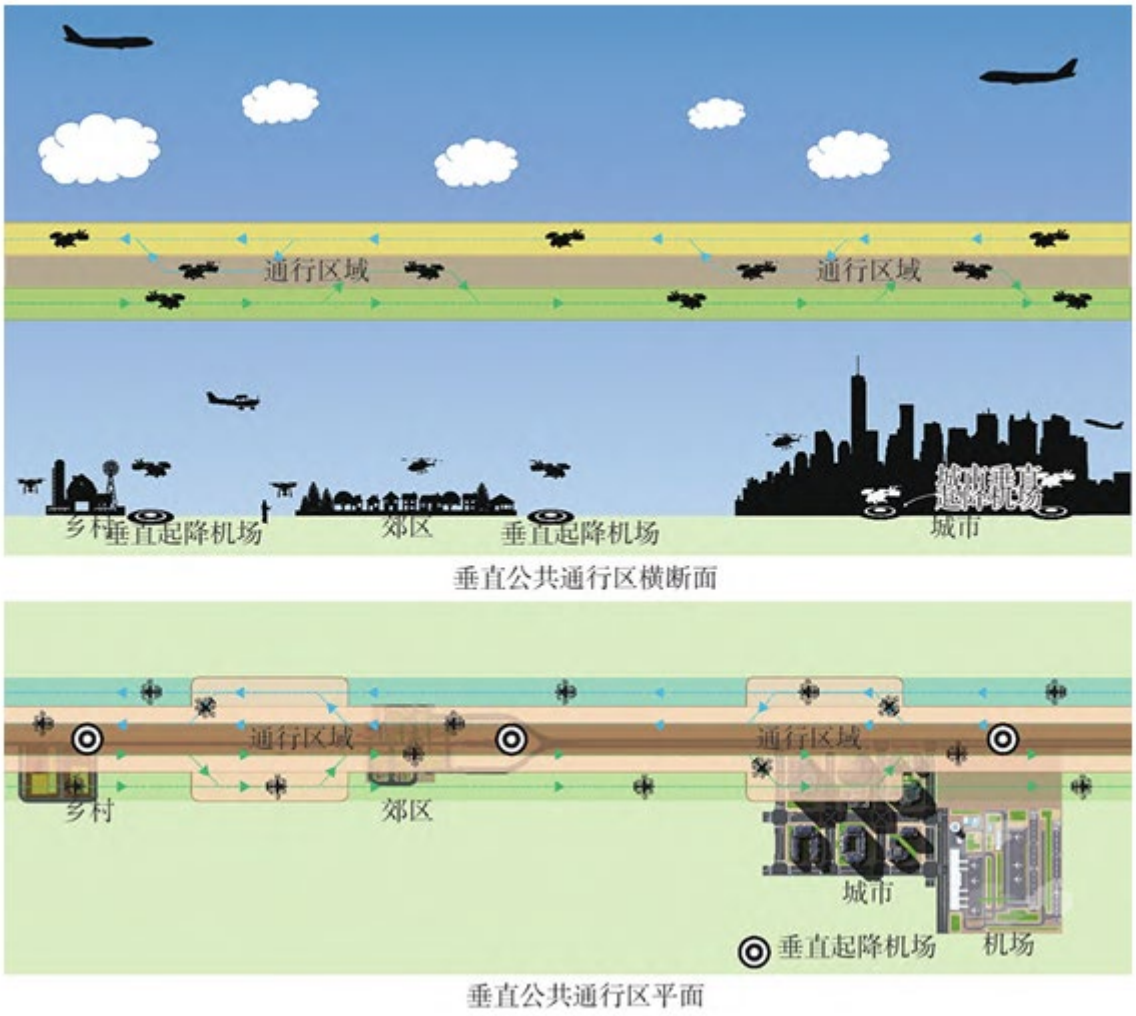
وسيسهم الاستخدام الكامل للمجال منخفض الارتفاع في تكوين بنية حضرية أكثر تكاملا تجمع بين العناصر المادية والحيز الجوي. وقد تراكمت في قطاع الطيران خبرات كثيرة في التقسيم الطبقي والمناطقي، لكن الاهتمام من منظور التخطيط الحضري لا يزال غير كاف. ولذلك من الضروري مناقشة المحتويات الأساسية لطرائق تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع الموجهة للطائرات المسيّرة بصورة استشرافية.

4.1 التخطيط المتكامل لتنسيق المجال الجوي منخفض الارتفاع والفضاء الحضري

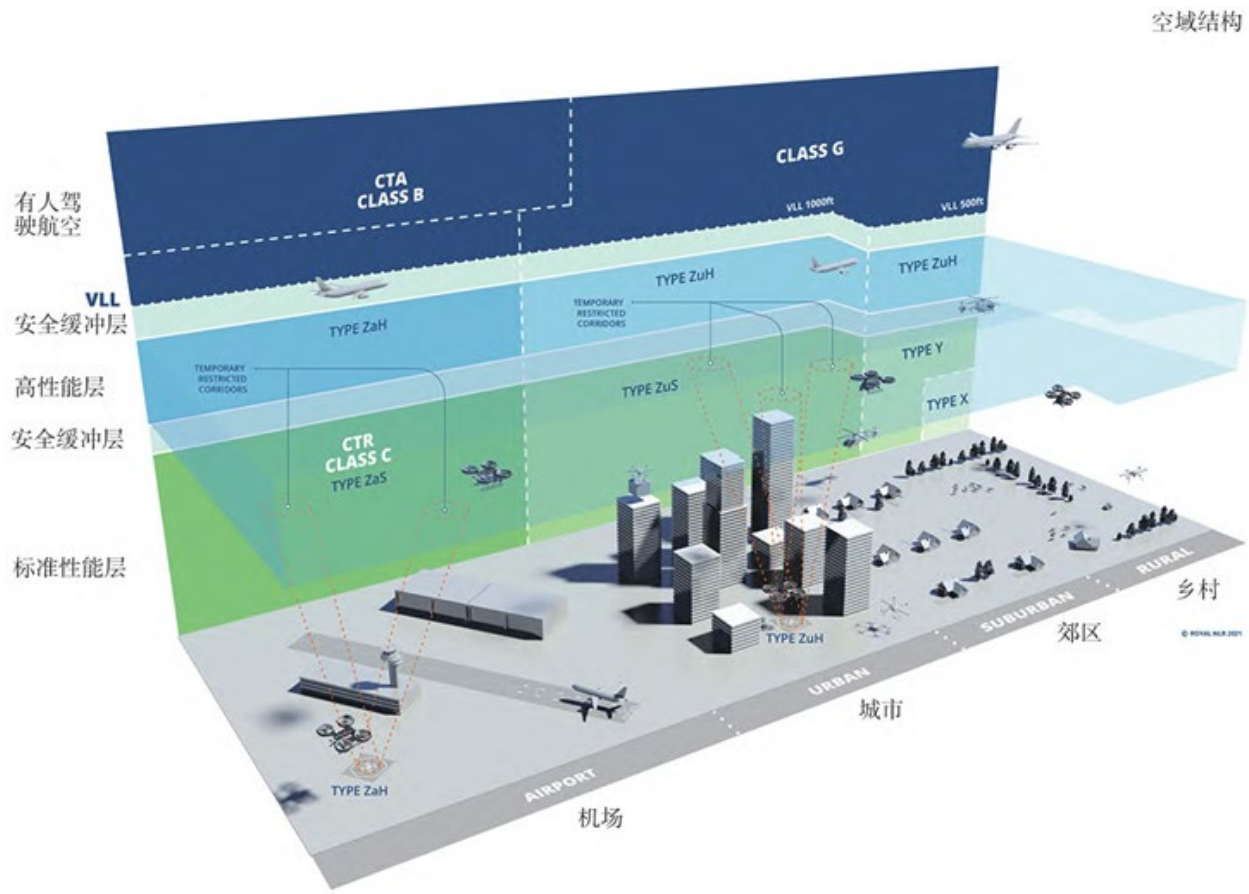
يراعي تصميم ممرات الطائرات المسيّرة لدى FAA والمشروع الأوروبي SESAR AMU-LED بصورة شاملة نسبيا توزيع المسارات في مراكز المدن والضواحي والأرياف والمناطق المحيطة بالمطارات [34-33] (الشكلان 8 و9). وتعكس معظم الرسوم التخطيطية الفروق بين المركز الحضري والأطراف والريف [33 ،26]. وتبرز هذه المقترحات الصلة بين تقسيم المجال الجوي وإدارة الشكل الحضري، وأهمية عناصر المدينة في التخطيط الجوي، لكنها لا تزال تفتقر إلى إدارة تفصيلية للمجال الواقع تحت 120 م والمخصص للطائرات المسيّرة.

ومن منظور التخطيط الحضري، يمكن تمثيل المورفولوجيا الحضرية من خلال المقطع الحضري-الريفي (urban-rural transect) المستخدم في الأكواد القائمة على الشكل (form-based codes) [35]. ويمكن فهم تخطيط المجال الجوي منخفض الارتفاع بوصفه إضافة محتوى تنظيمي جديد إلى هذا المقطع، بما ينشئ إطارا مكانيا مشتركا لتقسيم المجال الجوي وضبط الفضاء الحضري.

وبناء على اختلاف المواقع الحضرية، يمكن استكشاف منهج جديد يدمج متطلبات تقسيم المجال الجوي وإدارة الفضاء الأرضي. أولا، ينبغي تمييز متطلبات التخطيط بين المركز والمناطق العادية والضواحي والريف والمناطق المحيطة بالمطارات، ثم إضافة ضوابط ارتفاع الطبقات والسرعات والمنشآت لكل منطقة. ثانيا، ينبغي مراعاة خصائص المنتجات وسيناريوهات الاستخدام ومتطلبات الإقلاع والهبوط والاتصال والشحن والتحكم، وربط توزيع هذه المنشآت بأنماط المقطع الحضري-الريفي. ثالثا، يجب أن يشمل التخطيط المتكامل مخاطر الأرض والجو وتدابير الطوارئ، بحيث تسهم مواقع المنشآت وضبط السعة في تقليل التصادمات وحماية المشاة والمركبات.



الشكل 8. تصميم ممرات الطائرات المسيّرة لدى إدارة الطيران الفيدرالية الأمريكية [33]



الشكل 9. تقسيم المجال الجوي في مشروع AMU-LED [34]

4.2 تصميم بنية تقوم على الطبقات والمناطق والممرات

تتمثل القضية المحورية في التصميم في تحديد بنية المجال الجوي، إذ تؤثر درجة تقييدها في السعة والسلامة والكفاءة. فالمجال قليل البنية، مثل المسار الحر في الشكل 2، يوفر سعة أكبر وكفاءة أعلى للمسارات، لكنه يتطلب تقنيات أكثر تقدما لضمان السلامة. أما البنية الأكثر تقييدا، مثل الممرات، فتتيح للمركبات الأبسط تقنيا العمل بدرجة موثوقة، لكنها قد تخفض الكفاءة وتزيد التأخير [29 ،8]. وبوجه عام يُفضل اعتماد بنية بسيطة وموثوقة قدر الإمكان [8]، تستوعب بأمان مركبات ذات مستويات تقنية مختلفة وتحافظ في الوقت نفسه على كفاءة التشغيل.

وتبين مراجعة الدراسات أن بنية المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع للطائرات المسيّرة تشمل، من منظور التخطيط الحضري، ثلاثة مكونات. الأول هو التقسيم حسب الارتفاع، كما في مقترح Amazon الذي يميز بين منطقة حركة سريعة ومنطقة محلية بطيئة. والثاني هو التقسيم بحسب نوع المجال الجوي واستعمالات الأرض وخصائص المنشآت، مع تحديد المناطق المسموح بها والمناطق المحظورة. والثالث هو تصميم ممرات رأسية وأفقية ومائلة، وتحديد عددها ومواقعها وعقدها. ففي شنتشن، على سبيل المثال، تستخدم خدمة التوصيل بالطائرات المسيّرة التابعة لشركة Meituan ممرات يُعتمد كل منها بصورة منفصلة.

4.3 تخطيط توزيع منشآت الطائرات المسيّرة

تتنوع الطائرات المسيّرة الصغيرة الملائمة للمجال الحضري منخفض الارتفاع من حيث الأداء والحجم [28]، ولذلك تختلف متطلباتها المكانية والجوية ومتطلبات المنشآت المساندة. وتستطيع طائرات Meituan عند الشحن الكامل تلبية طلبات التوصيل ضمن نصف قطر 3 كم في مدة لا تتجاوز 15 دقيقة [36]، بينما تنظم Antwork مناطق توزيع بنصف قطر 15-10 كم حول محطات لوجستية ذكية [37]. ومن ثم يختلف نطاق الخدمة باختلاف خصائص المنتج.

وتختلف كذلك البنية التحتية المساندة. لذا يلزم تخطيط منهجي هرمي ومصنف لنقاط إقلاع وهبوط الطائرات المسيّرة المخصصة للخدمات اللوجستية الحضرية وفقا لمستويات الطلب المختلفة [38]. فمن ناحية، ينبغي ربط كل نوع من الطائرات المسيّرة بمنشآت الإقلاع

والهبوط والاتصال والشحن والتحكم ودمجها في البنية العامة للمجال الجوي. ومن ناحية أخرى، يجب إلى جانب البنية التحتية للنقل واللوجستيات التخطيط لمنشآت الطوارئ، مثل محطات التحكم الأرضية ومواقع الهبوط الاضطراري.

4.4 إعداد الآليات والمعايير المنظمة للعلاقة بين الجو والأرض

مع انتشار استخدام الطائرات المسيّرة في المدن، ترتفع قيمة المجال الجوي منخفض الارتفاع ويتحول من مورد طبيعي إلى مورد اقتصادي [35]. غير أن اللوائح لا تحدد بوضوح الحد الأدنى للارتفاع، أي إلى أي مدى يمكن للمركبة أن تنخفض. ومن منظور قانون الملكية التقليدي، يظهر هذا التعارض في صورة تقييد للحقوق المكانية بواسطة حقوق المجال الجوي [13].

ويشبه هذا التعارض دور حق مرور السيارات في المدينة، واحتمال اتساعه أو انكماشه مع المركبات ذاتية القيادة، والصراع المزمن بين الحقوق العامة والخاصة في مناطق الارتداد على واجهات الشوارع، وكذلك آليات تخصيص معامل كثافة البناء ومكافأته ونقله. ولذلك تستحق التحولات في العلاقة بين الحقوق المكانية وحقوق المجال الجوي دراسة استشرافية.

ولمعالجة تعارض الحقوق في المجال منخفض الارتفاع، يقترح بعض الباحثين تطبيق نظرية ثنائية للملكية [20]، وبناء حقوق المجال الجوي حول حق الانتفاع بالسلع العامة تحت تدخل الدولة [9]، بحيث يتحول «حق استخدام المجال الجوي» إلى عامل إنتاج جديد شبيه بحق استخدام الأرض [39]. وفي مجال التخطيط الحضري، ينبغي إعداد آليات ومعايير لإدارة الحقوق عند الحد الفاصل بين الجو والأرض. أولا، يجب أن تتكيف الأساليب التقنية مع الخصائص المكانية وفروق القيمة بين استعمالات الأرض. وثانيا، في هذا المجال المتداخل بين الملكية العامة والخاصة، ينبغي تقييم قيمة المجال الجوي فوق أنواع الأراضي المختلفة، ودراسة نماذج الإدارة المناسبة، وتصميم آليات مستلهمة من تنظيم كثافة البناء ونقل حقوق التطوير.

5 الخاتمة

تظل قيمة مورد المجال الجوي منخفض الارتفاع، في جوهرها، شكلا من «ريع الأرض» ناتجا عن السيطرة الاحتكارية على المورد [40]. وتؤدي فروق الموقع الحضري إلى فروق في القيمة المكانية، ومن ثم في قيمة المجال الجوي، وهو ما سيعيد بدوره تشكيل قيمة الفضاء الحضري. واستجابة لهذا الاتجاه، سيصبح تخطيط المجال الجوي الحضري منخفض الارتفاع مجالا مستقلا للابتكار ويدفع إلى تجديد شامل للتخطيط المكاني.

ويجعل القرب بين المجال الجوي منخفض الارتفاع والبيئة المبنية على الأرض من تنسيقهما مسألة محورية. وفي المناطق الحضرية المختلفة، سيزداد ارتباط التخطيط الجوي بالتخطيط الأرضي. ويتوقف نجاح التنفيذ على القدرة على دمج مبادئ تقسيم المجال الجوي وضبط الفضاء، وتحديد بنية عقلانية، وتسوية علاقات الحقوق عند الحد الفاصل بين الجو والأرض بكفاءة. وقد يتجه التخطيط الحضري مستقبلا إلى دمج تخطيط المجال الجوي والتخطيط المكاني، وهو ما يتطلب تعاون المختصين في الطيران والاتصالات والتخطيط الحضري والقانون.

ملاحظات

① تركز هذه الدراسة أساسا على الطائرات المسيّرة.

② يستند مفهوم تخطيط المجال الجوي منخفض الارتفاع المستخدم في المقال إلى الأدبيات الأكاديمية في مجال الطيران. وفي سياق UAM يشير أساسا إلى التخطيط من منظور حركة الطيران منخفض الارتفاع، كما يشمل الطائرات المسيّرة الاستهلاكية وغيرها من الاستخدامات الوظيفية.

③ يشير المجال من الفئة G إلى المجال الواقع خارج الفئتين B, C وخارج الفئة W، وتحت ارتفاع حقيقي يبلغ 300 م؛ كما يشمل المجالات الواقعة تحت 6 كم فوق متوسط مستوى سطح البحر والتي لا تؤثر في رحلات النقل العام المدني. وتُحدد الفئة B فوق مطارات النقل المدني، بينما تُحدد الفئة C فوق مطارات الطيران العام المزودة ببرج مراقبة، وغالبا ما تكون في صورة حلقة بنصف قطر 5 كم، من سطح المدرج إلى ارتفاع 600 م فوق منسوب المطار.

④ جاءت قيمة 120 م من تحويل 400 قدم، وهي ليست قيمة مطلقة. فبعض المعايير الأوروبية واليابانية تحدد الحد الأعلى للمجال منخفض الارتفاع عند 150 م، بينما تحدد كوريا الجنوبية أقصى ارتفاع لطيران الطائرات المسيّرة عند 300 م؛ انظر المرجع [21].

قائمة المراجع

[1] ABBOTT C. مدن المستقبل: المدينة في أدب الخيال العلمي [M]. Translated by Research Team on Global City Development Strategies, Shanghai Academy of Social Sciences. Shanghai: Shanghai Academy of Social Sciences Press, 2018.

[2] RATTI C, CLAUDEL M. المدينة الذكية [M]. Translated by ZHAO Lei. Beijing: CITIC Press Group, 2019.

[3] CURETON P. مستقبل الطائرات المسيّرة: الأنظمة الجوية غير المأهولة في تصميم المناظر الطبيعية والتصميم الحضري [M]. New York: Routledge, 2021.

[4] SUGA Hiroyuki, WATANABE Shuichi, ONO Tatsuya, et al. التنمية الموجهة بالتنقل الجوي: تسريع بناء مدينة من الجيل الجديد تصنع مستقبلا ملهما [EB/OL]. 2023-10-20 [2024-03-01]. https://www.nikken.co.jp/ja/insights/air_mobility_oriented_development.html.

[5] NODJOMIAN A T, KOCKELMAN K. كيف تؤثر البيئة المبنية في الاهتمام بامتلاك المركبات ذاتية القيادة واستخدامها؟ [J]. Journal of Transport Geography, 2019, 78: 115-134.

[6] GARROW L A, GERMAN B J, LEONARD C E. التنقل الجوي الحضري: مراجعة شاملة وتحليل مقارن مع النقل الأرضي الذاتي والكهربائي لتوجيه البحوث المستقبلية [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 132: 103377.

[7] LIAO Xiaohan, QU Wenqiu, XU Chenchen, et al. مراجعة للتنقل الجوي الحضري والبنية التحتية الجديدة للمسارات الجوية العامة منخفضة الارتفاع [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2023, 44(24): 6-34.

[8] BAURANOV A, RAKAS J. تصميم المجال الجوي للتنقل الجوي الحضري: مراجعة للمفاهيم والمناهج [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2021, 125: 100726.

[9] WANG Lizhi. حقوق المجال الجوي: تحليل مقارن يتمحور حول علاقتها بالحقوق المكانية [J]. Science of Law (Journal of Northwest University of Political Science and Law), 2017, 35(4): 124-132.

[10] State Council of the People's Republic of China. اللائحة المؤقتة لإدارة رحلات الطائرات غير المأهولة [S/OL]. 2023-06-28 [2024-03-01]. https://www.gov.cn/zhengce/content/202306/content_6888799.htm.

[11] NESTA. التحليق عاليا: مستقبل تقنيات الطائرات المسيّرة في مدن المملكة المتحدة [R/OL]. 2018 [2024-03-01]. https://www.nesta.org.uk/report/flying-high-challenge-future-of-drone-technology-in-uk-cities/exploring-urban-drone-integration/.

[12] ZHANG Weibin, JIANG Hao. ملاحظات حول مفهوم المجال الجوي [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition), 2021, 34(3): 127-133.

[13] JIANG Hao. مسارات التوفيق بين حقوق المجال الجوي منخفض الارتفاع والحقوق المكانية [J]. Journal of Zhengzhou University of Aeronautical Industry Management (Social Science Edition), 2020, 39(3): 23-31.

[14] ZHANG Honghai, ZOU Yiyuan, ZHANG Qiqian, et al. مراجعة لأبحاث إدارة التنقل الجوي الحضري في المستقبل [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(7): 82-106.

[15] XIE Chunsheng, GUO Li, ZHANG Hong. إدارة المجال الجوي منخفض الارتفاع وتخطيط مجال الطيران العام [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2016.

[16] ZHANG Honghai, LI Shan, YI Jia, et al. مراجعة لأبحاث تخطيط المسارات الجوية الحضرية منخفضة الارتفاع [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(6): 827-838.

[17] LI Chenglong, QU Wenqiu, LI Yandong, et al. eVTOL مراجعة لإدارة النقل الجوي الحضري الموجهة لمركبات [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2020, 20(4): 35-54.

[18] TANG H L, ZHANG Y, MOHMOODIAN V, et al. التخطيط الآلي للرحلات في بيئة التنقل الجوي الحضري عالي الكثافة [J/OL]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2021, 131: 103324. https://doi.org/10.1016/j.trc.2021.103324.

[19] BALAKRISHNAN K, POLASTRE J, MOOBERRY J, et al. مخطط للسماء: خارطة طريق للدمج الآمن للطائرات ذاتية التشغيل [R]. Toulouse: Airbus LLC, 2018.

[20] HOEKSTRA J M, ELLERBROEK J, SUNIL E, et al. التوجيه الجغرافي: خفض تعقيد الحركة لزيادة سعة المجال الجوي للطائرات المسيّرة [C]// 2018 8th International Conference for Research in Air Transportation. Barcelona: ICRAT, 2018.

[21] SHRESTHA R, OH I, KIM S. مراجعة لمفهوم التشغيل والتطورات والتحديات في إدارة الحركة الجوية الحضرية [J]. Frontiers in Future Transportation, 2021, 2: 626935.

[22] AMAZON. إعادة النظر في نموذج المجال الجوي من أجل الدمج الآمن للأنظمة الجوية الصغيرة غير المأهولة [R/OL]. 2015 [2024-02-04]. https://images-na.ssl-images-amazon.com/images/G/01/112715/download/Amazon_Revising_the_Airspace_Model_for_the_Safe_Integration_of_sUAS.pdf.

[23] FAA. نظرة عامة على عمليات التحليق فوق الأشخاص [EB/OL]. 2022-11-10 [2024-07-13]. https://www.faa.gov/uas/commercial_operators/operations_over_people.

[24] XU C C, LIAO X H, TAN J M, et al. التقدم الحديث في سياسات وتقنيات تنظيم الطائرات غير المأهولة في المجال الحضري منخفض الارتفاع [J]. IEEE Access, 2020, 8: 74175-74194.

[25] CHEN Ming, HE Ning, HONG Chen, et al. تخطيط المسارات في إدارة حركة الطائرات المسيّرة باستخدام خوارزمية A* تعاونية هرمية محسّنة [J/OL]. Computer Engineering and Applications, 2023-11-28 [2024-03-02]: 1-10. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2127.TP.20231127.1401.016.html.

[26] OOSEDO A, HATTORI H, YASUI I, et al. محاكاة إدارة حركة الأنظمة الجوية غير المأهولة لنماذج التوصيل بالطائرات المسيّرة في اليابان عام 2030 [J]. Journal of Robotics and Mechatronics, 2021, 33(2): 348-362.

[27] SAMIR L N, DANOY G, MUSIAL J, et al. إنترنت الطائرات غير المأهولة: نموذج متعدد الطبقات للمجال الجوي منخفض الارتفاع لإدارة موزعة لحركة الطائرات المسيّرة [J]. Sensors, 2019, 19: 4779.

[28] SHRESTHA R, BAJRACHARYA R, KIM S. إدارة حركة الطائرات غير المأهولة المدعومة بتقنيات الجيل السادس: منظور مستقبلي [J]. IEEE Access, 2021, 9: 91119-91136.

[29] CHO J, YOON Y. كيفية تقييم سعة المجال الجوي الحضري: منهج طوبولوجي باستخدام الأسوار الجغرافية للمناطق المسموح بها والمحظورة [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2018, 92: 137-149.

[30] ZHANG Honghai, YI Jia, LI Shan, et al. مراجعة لأبحاث تقييم سعة المجال الجوي منخفض الارتفاع [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(6): 78-93.

[31] BAI Long, LU Zi, DU Xinru, et al. قواعد وطرائق تحديد ممرات نشاط الطائرات المسيّرة في المجال الجوي الحضري منخفض وشديد الانخفاض [J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(11): 1197-1204.

[32] QIN Rui. إعادة النظر في اقتصاد الارتفاعات المنخفضة (III): بعض قضايا المجال الجوي منخفض الارتفاع [EB/OL]. 2022-12-11 [2024-01-25]. https://www.163.com/dy/article/HOA783R50530G3Q7.html.

[33] FAA. التنقل الجوي الحضري (UAM): مفهوم العمليات، الإصدار 2.0 [R]. 2023.

[34] SESAR Joint Undertaking. إظهار المنافع اليومية لـ U-space: النتائج الأولية لعروض SESAR خلال 2020-2022 [R]. Luxembourg, 2022.

[35] DUANY PLATER-ZYBERK & COMPANY. مكتبة الصور: المقاطع الريفية-الحضرية [EB/OL]. 2008-03-28 [2024-02-10]. http://transect.org/rural_img.html.

[36] LIU Xiaopeng. طائرات Meituan المسيّرة تدعم التوصيل في «الكيلومترات الثلاثة الأخيرة» [J]. China Logistics & Purchasing, 2022(18): 28-29.

[37] WANG Yang. تمديد التوصيل الفوري في المرحلة الأخيرة عبر تكامل الطريق والجو — مقابلة مع Yu Hang، الشريك Antwork: المؤسس لشركة Hangzhou Antwork Network Technology Co., Ltd. [J]. Transportation Construction & Management, 2020(3): 118-123.

[38] ZHANG Honghai, FENG Dikun, ZHANG Xiaowei, et al. تخطيط توزيع مواقع إقلاع وهبوط الطائرات المسيّرة المخصصة للخدمات اللوجستية الحضرية [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2022, 22(3): 207-214.

[39] International Digital Economy Academy. الكتاب الأبيض لتطوير اقتصاد الارتفاعات المنخفضة (2.0): حل رقمي متكامل [R]. 2023.

[40] LIAO Xiaohan, HUANG Yaohuan, XU Chenchen. دراسة موارد المجال الجوي منخفض الارتفاع الموجهة لتطبيقات الطائرات المسيّرة [J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2607-2620.

النسخة المنقحة: أغسطس 2024

ترجمة بمساعدة الذكاء الاصطناعي