تقييم مرونة الأحياء السكنية الحضرية تجاه أمطار السيول استنادا إلى اضطراب خصائص تنقل السكان وآثاره التخطيطية: دراسة حالة شنتشن

المؤلفون

CHENG Yulin, GAN Xinyue, YANG Xiaochun, GUO Renzhong

الملخص

تمثل الأحياء السكنية وحدات أساسية لتحليل مرونة السلامة الحضرية وأنماط تباينها المكاني. وتعتمد الدراسات القائمة غالبا على بيانات ساكنة لإجراء تقييمات كلية، بما يجعلها عاجزة عن التقاط التطور الديناميي لمرونة المدن على المقاييس الدقيقة. تتخذ هذه الدراسة اضطراب حركة السكان في الزمان والمكان أثناء الكوارث مؤشرا محوريا لقياس المرونة، وتبني إطارا مدفوعا بالبيانات لتقييم مرونة الأحياء السكنية تجاه أمطار السيول على مستوى الحي. وبالاستناد إلى بيانات إشارات الهاتف المحمول، يطبق الإطار على 1,087 حيا سكنيا في شنتشن خلال فترة الهطول المركز في عاصفة "9.7" المطرية القصوى عام 2023. وتبين النتائج أن أحياء الإسكان التجاري تتمتع بمرونة أعلى بكثير من القرى داخل المدينة، وأن الأحياء المنشأة في فترات مختلفة تظهر تباينا واضحا في المرونة أثناء الكارثة وبعدها. كما يؤكد تحليل الارتباط أن غمر الطرق بالمياه عامل مهم في اضطراب تنقل السكان، ويثبت فاعلية الإطار في تحديد الفروق المكانية في مرونة الأحياء. وتكشف عملية التحقق الديموغرافي كذلك أن استخدام بيانات إشارات الهاتف المحمول في تقييم المرونة على المقياس الدقيق قد يؤدي إلى التقليل من تقدير المخاطر الحقيقية في الأحياء المتقدمة في العمر سكانيا. ويوفر هذا الإطار دعما كميا للرصد الديناميي للكوارث والإنذار المبكر، وتشخيص التجديد الحضري، والتخطيط المستدام.

الكلمات المفتاحية

مرونة الأحياء السكنية تجاه أمطار السيول؛ بيانات إشارات الهاتف المحمول؛ اضطراب التنقل؛ التباين المكاني؛ إطار التقييم

المقدمة

في ظل تزايد حدة التطرف المناخي عالميا، أصبحت المرونة المناخية الحضرية قضية مركزية في البحث الأكاديمي والممارسة الحوكمية. وبوصف الحي السكني وحدة أساسية في إدارة المدينة، فهو ليس فقط الحامل المكاني للحياة اليومية للسكان، بل أيضا خط المواجهة الأول في إدارة الطوارئ عند وقوع الكوارث. وقد أدرجت مدن دولية كبرى مثل لندن ونيويورك تعزيز قدرة الأحياء على مقاومة الكوارث الطبيعية ضمن استراتيجياتها المهمة للتكيف المناخي [1]. غير أن المدن الصينية الضخمة والكبرى جدا شهدت في السنوات الأخيرة تكرارا متزايدا لأحداث المطر الشديد. وقد تحافظ النظم المناخية على دوران متبق نشط بفعل "تأثير القطار"، فتؤدي الأمطار المتقطعة إلى آثار ثانوية مستمرة [2]. وتحد هذه الأحداث بشدة من التشغيل الطبيعي لوظائف المدينة، بما في ذلك إنتاج السكان وحياتهم اليومية، كما تؤخر عملية التعافي بعد الكارثة.

تعتمد الدراسات القائمة غالبا على مؤشرات ساكنة لتقييم المرونة الحضرية على المستوى الكلي، وهو ما يصعب معه تحديد فروق المرونة ديناميا عبر دورة الكارثة الكاملة على مستوى الحي السكني. لذلك تقدم هذه الدراسة خصائص اضطراب تنقل السكان في الزمان والمكان، وتبني إطارا مدفوعا بالبيانات لتقييم مرونة الأحياء السكنية الحضرية تجاه أمطار السيول. ويستخدم الإطار لتحليل عاصفة شنتشن المطرية القصوى "9.7" عام 2023. فهو يحدد التباين الزماني والمكاني في المرونة بين أنماط الأحياء المختلفة، ويتحقق من صلاحية النموذج باستخدام بيانات فعلية عن الطرق المغمورة بالمياه، ويكشف في الوقت نفسه عن تحيزات محتملة في تطبيقات البيانات الضخمة عند تقييم المرونة على المقياس الدقيق. وتهدف الطريقة إلى توفير أساس علمي للاستجابة الطارئة الدقيقة، وتشخيص تجديد الأحياء، والتخطيط المتكيف مع المناخ.

1. مراجعة طرائق تقييم مرونة المدن تجاه أمطار السيول

شهد بحث المرونة الحضرية انتقالا نموذجيا من الهشاشة إلى المرونة [3]. وقد ورثت الدراسات السابقة [4-6] في الغالب إطار الهشاشة التقليدي القائم على منظومات مؤشرات مركبة، وركزت على الخصائص الذاتية السابقة للكارثة. وبسبب محدودية إتاحة البيانات، كان اختيار المؤشرات وتحديد أوزانها عرضة حتما لتحيزات ذاتية. وبعد أن طور Cutter وآخرون [7-9] مؤشر الهشاشة الاجتماعية ومؤشرات خط الأساس لمرونة المجتمعات المحلية، تحول الاهتمام البحثي من التقييم الساكن إلى الاستجابة الدينامية للنظام. وبدأ عدد كبير من الباحثين في استخدام بيانات زمانية مكانية متعددة المصادر لالتقاط الخصائص العملية للمرونة الحضرية.

تشير مرونة المدن تجاه أمطار السيول إلى القدرة المركبة للنظام الحضري على مقاومة آثار العواصف المطرية والفيضانات وامتصاصها والتكيف معها والتعافي منها [10-11]. واتساقا مع المفهوم العام للمرونة، يتضمن معناها الجوهري عادة ثلاثة أبعاد: خفض تدهور الأداء أثناء الكارثة بفاعلية، والتعافي السريع من الاضطراب، وتحقيق مستوى عال نسبيا من التعافي [12-15]. وتمتد المقاييس المكانية لهذه البحوث من الفرد أو المبنى إلى المجتمع المحلي والمدينة والمنطقة [16-18]. وسواء من خلال تحليل السيناريوهات القائم على برامج المحاكاة [19]، أو طرائق ديناميات النظم المعتمدة على تحليل الشبكات الاجتماعية [20]، أو التحليل التجريبي القائم على البيانات الضخمة [21-24]، أو منحنيات المرونة [25]، فقد أصبحت كميّة المرونة أداة نظرية واسعة الاستخدام.

تستطيع البحوث القائمة على منحنيات المرونة التقاط المسار الزمني لأداء النظام قبل الكوارث وبعدها على نحو منهجي. فمن خلال استخراج نقاط رئيسية مثل نقطة الصدمة، ونقطة التعافي، ونقطة الاستقرار، يمكن قياس مساحة الاضطراب الكلية، ومعدل الفقد الأقصى، وسرعة التعافي، وشكل المنحنى [26-29]. وقد أصبح هذا النهج أحد النماذج الأساسية في دراسات المرونة، وطبق لوصف الاستجابة الدينامية لوظائف حضرية حيوية مثل شبكات النقل، والصرف، وإمدادات الكهرباء، والمرافق الطبية، والناتج الاقتصادي [30]. وتوفر البيانات الضخمة دعما عالي الدقة لتحليل السلوك الزماني المكاني للحشود الحضرية، وتستخدم على نطاق متزايد في نمذجة السلوك أثناء الكوارث. فقد وسعت دراسات قائمة أطر منحنى المرونة باستخدام بيانات وسائل التواصل الاجتماعي، ومسارات GPS، وبيانات إشارات الهاتف المحمول. ويستخدم بعضها وحدة اليوم لتحديد الاضطراب الكلي طويل الأجل وأنماط التعافي ذات القمتين [22]، بينما يستخدم بعضها الآخر وحدة الساعة لالتقاط الأثر قصير الأجل للعواصف المطرية الشديدة، فيكشف أن تعافي النظام قد يتأخر عن نهاية الحدث [23]، أو يحدد أثر التعافي المتأخر في تدفقات شبكة التنقل [24]. وتكشف هذه الدراسات خصائص اضطراب التنقل الناجم عن الطقس المتطرف، لكنها لا تزال غير كافية في معالجة الآثار متعددة المراحل للكوارث المناخية.

غالبا ما تجمع الدراسات القائمة بين صدمة أثناء الكارثة وتعاف بعد الكارثة في مقياس اضطراب واحد، ما يجعل من الصعب التمييز بين دوافع المرحلتين وآثارهما التراكمية، ومن ثم يضعف فهم آليات الكارثة. وعلى وجه الخصوص، لا يزال تقييم المرونة الديناميي على مستوى الحي السكني يفتقر إلى طرائق مناسبة. ونادرا ما تتوفر وسائل فعالة لقياس أثر كوارث المطر الشديد على سلوك تنقل سكان الأحياء في مراحل مختلفة [31]. ولمعالجة هذه الفجوة، تبني هذه الدراسة منحنيات قصيرة الدورة لتقلبات تنقل سكان الأحياء قبل الكارثة وبعدها على أساس الساعة [32]. وتستخدم زمن إزالة مياه الغمر لتقسيم المراحل. وتعامل مرحلتا المقاومة والتعافي التقليديتان بوصفهما مرحلة أثناء الكارثة لقياس الأثر المباشر، وتضيف مرحلة اضطراب متأخر بوصفها مرحلة ما بعد الكارثة لقياس الآثار الثانوية. ويتوافق هذا النهج مع الخصائص المناخية متعددة المراحل للعواصف المطرية القصوى، ويمكّن من التقييم الديناميي لمرونة أنواع مختلفة من الأحياء الحضرية، ويدعم تحويل التشخيص الدقيق إلى حوكمة طارئة وآثار تخطيطية [33].

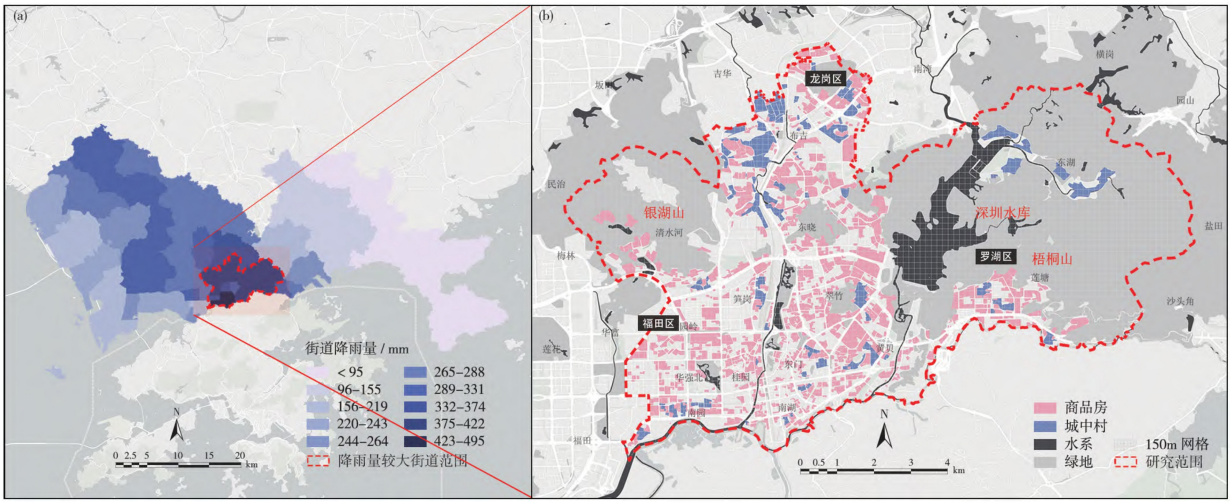
2. منطقة الدراسة التجريبية وطرائق البحث

2.1 منطقة الدراسة ومصادر البيانات ومعالجتها

وفقا لمرصد شنتشن للأرصاد الجوية، تعرضت شنتشن من الساعة 17:00 يوم 7 سبتمبر إلى الساعة 6:00 يوم 8 سبتمبر 2023 لعاصفة مطرية شديدة تجاوزت السجلات التاريخية. وأظهر النظام الحملي القوي "تأثير قطار" واضحا، ما جعل الأمطار المتقطعة تستمر في التأثير على عملية التعافي بعد الكارثة. وتختار هذه الدراسة 14 ناحية فرعية ذات هطول مركز بوصفها منطقة الدراسة، وتشمل كامل منطقة لوهو، ونواحي يوانغانغ وهواكيانغبي ونانيوان في منطقة فوتيان، وناحية بوجي في منطقة لونغغانغ (الشكل 1).

باستخدام بيانات مناطق الاهتمام للأحياء السكنية من خرائط بايدو كأساس، وبالدمج مع بيانات OpenStreetMap، وبيانات المتجهات المعمارية لشنتشن لعام 2018، ونقاط إحداثيات الإسكان التجاري من منصة Anjuke، تحدد الدراسة وتنتقي 1,087 وحدة حي سكني في منطقة الدراسة، منها 103 قرى داخل المدينة و984 حيا للإسكان التجاري (الشكل 1(b)). وتستمد خصائص تنقل السكان من بيانات إشارات الهاتف المحمول التي توفرها منصة China Unicom Smart Footprint DAAS. وتضم مجموعة البيانات نحو مليون مسار حركة لأجهزة مجهولة الهوية في منطقة الدراسة قبل العاصفة المطرية وبعدها، خلال الفترة من 2 سبتمبر إلى 24 سبتمبر 2023.

إضافة إلى ذلك، تستخدم الدراسة معلومات الطرق المغمورة بالمياه أثناء عاصفة "9.7" عام 2023، الصادرة عن مكتب شؤون المياه في شنتشن ومكتب إدارة الطوارئ، إلى جانب بيانات البنية الديموغرافية على مستوى الناحية الفرعية من التعداد الوطني السابع للسكان لعام 2020، للتحقق من موثوقية طريقة التقييم.



（a）深圳“9·7”极端暴雨 24 h降雨量空间分布示意图　　（b）研究范围内住区空间单元分布图

الشكل 1. منطقة الدراسة

يتضمن الشكل خريطة للتوزيع المكاني للهطول خلال 24 ساعة في عاصفة شنتشن المطرية القصوى "9.7"، وخريطة لوحدات الأحياء السكنية المكانية ضمن منطقة الدراسة.

2.2 طرائق البحث

تقيس هذه الدراسة درجة تأثر الأحياء السكنية بالعواصف المطرية القصوى وقدرتها على التعافي من خلال حساب تغير حجم تنقل السكان أثناء الكارثة مقارنة بفترات غير كارثية. ثم تجمع بين بيانات الطرق المغمورة، ونطاقات الوصول سيرا، واتصالية الطرق الخارجية، والبنية الديموغرافية على مستوى الناحية الفرعية للتحقق متعدد الأبعاد. وتتكون عملية التقييم من ثلاث خطوات رئيسية (الشكل 2).

2.2.1 بناء قاعدة بيانات التنقل

تستخدم الدراسة لغة الاستعلامات الهيكلية (SQL) على منصة DAAS لجمع سجلات معلومات زمانية مكانية مجهولة الهوية، بما يضمن الاستخدام القانوني للبيانات والحماية الصارمة لخصوصية المستخدمين. وتستورد حدود الأحياء السكنية إلى المنصة، ثم يستخدم SQL لحساب إجمالي حجم التنقل الساعي لسكان كل حي، بما يشكل قاعدة بيانات لتنقل الأحياء تغطي مراحل ما قبل الكارثة وأثناءها وبعدها.

تختار الدراسة تغيرات حجم التنقل من 6 سبتمبر إلى 15 سبتمبر 2023، أي فترة متصلة قدرها 10 أيام، كأساس لمنحنيات تقلب التنقل. وتغطي هذه الفترة العاصفة المطرية وأسبوع عمل لاحق، بما يسمح بالتقاط اتجاهات التنقل المستمرة بعد الكارثة. ولتجنب العطل الخاصة، اختير يوم 5 سبتمبر، وهو يوم صحو قبل إنذار الكارثة، والمتوسط الساعي من 18 سبتمبر إلى 22 سبتمبر بعد استقرار الحدث، بوصفهما خط أساس لأيام العمل غير الكارثية. كما استخدم يوما 2 و3 سبتمبر، ويوما 23 و24 سبتمبر، لحساب خط أساس السبت والأحد غير الكارثيين. وتشكل هذه المعطيات معا ثلاثة خطوط أساس ساعية لكل حي: يوم عمل، وسبت، وأحد.

يستخدم المتوسط المتحرك لبناء منحنيات تقلب التنقل. وتحدد النافذة عند 7 ساعات لموازنة تنعيم الضوضاء مع الاحتفاظ باتجاهات التضرر. ويبين التحليل الأولي أن أكثر من 50% من الأحياء تظهر نمطا مرحليا لاضطراب التنقل يتمثل في "صدمة أثناء الكارثة زائد اضطراب متأخر".

2.2.2 تقييم مرونة الأحياء تجاه أمطار السيول وتصنيفها

اتباعا للمنطق الأساسي لمنحنيات المرونة، تقيس الدراسة أداء النظام في مواجهة حدث كارثي ضمن فترة زمنية متصلة. فهي تحلل تغير حجم تنقل السكان الساعي قبل العاصفة المطرية وبعدها، وتمثل مرونة الحي تجاه أمطار السيول عكسيا بدرجة اضطراب سلوك التنقل لدى السكان. وقد خضعت الطريقة لتحسين تكيفي وفقا للخصائص المناخية لعاصفة "9.7".

أولا، تقدم الدراسة مرحلة اضطراب متأخر لالتقاط الآثار الثانوية للعواصف المطرية على تنقل السكان. فالأثر على الحركة غالبا ما يكون متعدد المراحل: صدمة مباشرة أولية بفعل المطر، ثم آثار متأخرة ناجمة عن أمطار متقطعة لاحقة، وقد يبقى التنقل مضطربا عدة أيام بعد انتهاء الهطول الرئيسي. لذلك، وخلافا لدراسات المرونة السابقة التي تركز غالبا على صدمة مفردة، تدرج هذه الدراسة

الاضطراب المتأخر بوصفه مرحلة ما بعد الكارثة في حساب مؤشرات المرونة، بما يسمح بتصوير أكثر اكتمالا لمرونة الأحياء عبر المراحل المختلفة للعاصفة المطرية وآثارها الثانوية.

ثانيا، يستخدم نطاق تقلب التنقل غير الكارثي لتحديد النقاط المميزة للكارثة. فتنقل السكان اليومي يتغير طبيعيا، ومن ثم فإن نقطة الصدمة ونقطة الاستقرار ليستا نقطتين صفريتين، بل تقاطعان مع نطاق التقلب الطبيعي. وتعرف الدراسة فرق حجم التنقل في الساعة t بأنه Delta St، وتحسب الانحراف المعياري sigma لسلسلة الفروق، وتستخدم sigma بوصفها الحد المرجعي لنطاق التقلب غير الكارثي.

ثالثا، تبني الدراسة مقياس شدة اضطراب التنقل للفرد بحيث يعزز الأثر التراكمي للمدة. وبحسب اختلاف شدة الاضطراب ومدته، يقسم الاضطراب إلى نمطين: قصير الأجل عالي الشدة، وطويل الأجل متوسط الشدة. وكلما طالت المدة، زاد عدد أنشطة التنقل المتأثرة، وتعاظم الاستهلاك التراكمي للموارد والخسارة الاجتماعية الاقتصادية. لذلك توزن شدة الاضطراب A زمنيا. ويبرز المؤشر المركب الكلفة التراكمية لاضطراب التنقل عبر دورة الكارثة [35]، ثم يطبع إلى "شدة اضطراب التنقل للفرد" لتيسير المقارنة بين الأحياء (الجدول 1). وبالمقارنة مع المؤشرات التقليدية، يكون هذا المقياس أكثر حساسية لفروق المرونة بين الوحدات المكانية الصغيرة.

وفقا لملخص مكتب الأرصاد الجوية في شنتشن [الملاحظة 1]، تستخدم 48 ساعة كخط فاصل بين مرحلتي أثناء الكارثة وبعدها. ويكون اضطراب أثناء الكارثة هو مجموع كل اضطرابات التنقل قبل خط 48 ساعة، ويحسب اضطراب ما بعد الكارثة بالطريقة نفسها بعده. وإذا امتد الاضطراب عبر خط 48 ساعة، يصنف بحسب المساحة الأكبر قبل الخط أو بعده. وأخيرا تستخدم طريقة K-means لتصنيف المرونة أثناء الكارثة وبعدها على نحو منفصل، بينما تستخدم قاعدة الكوع ومعامل الصورة الظلية لتحديد العدد الأمثل للعناقيد.

الجدول 1. خوارزميات المؤشرات

المؤشر	الصيغة	الدلالة
نطاق التقلب غير الكارثي	* sigma = sqrt((1/N) sum_t(Delta St - mean(Delta S))^2), N = 24 h	تحسب sigma من فرق حجم التنقل بين يومين عاديين قابلين للمقارنة خلال 24 ساعة، وتستخدم بوصفها الحد المرجعي لتقلب التنقل في غير أوقات الكارثة.
شدة اضطراب التنقل للفرد	(Ni T1); A1 = integral / V1 = A1 - from t0 to t2 of [max(0, Qmax Qt - sigma)] dt (t2 - t0)	يمثل V1 شدة اضطراب التنقل للفرد في التقلب الأول للحي i؛ وNi إجمالي سكان الحي؛ وA1 شدة الاضطراب الأول وتعكس الأثر التراكمي لانخفاض التنقل من نقطة الصدمة إلى نقطة الاستقرار؛ وT1 مدة الاضطراب؛ وQmax خط أساس التنقل، وQt حجم التنقل الفعلي للسكان.

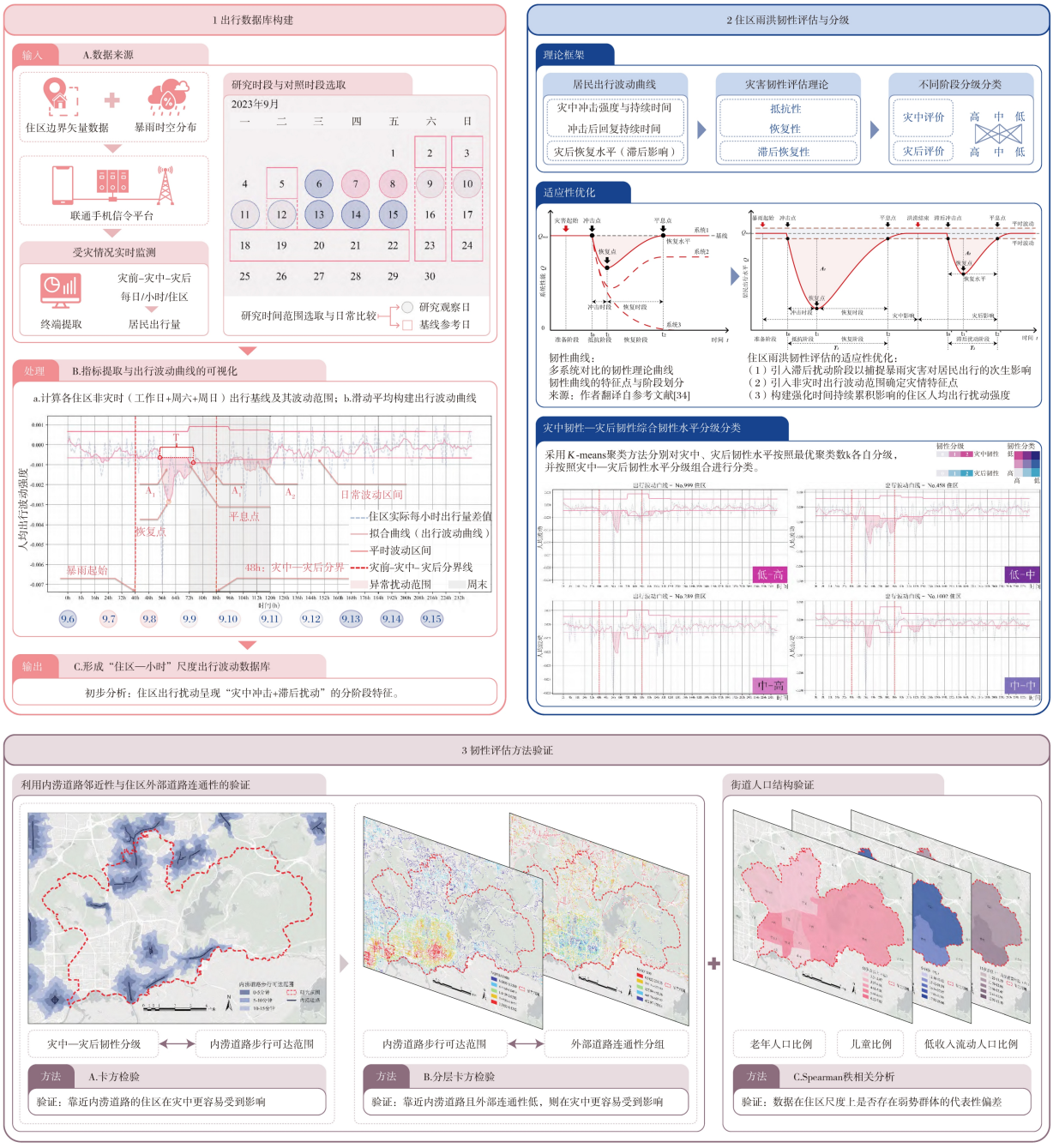
2.2.3 التحقق من طريقة التقييم

للتحقق من قابلية تطبيق طريقة التقييم وموثوقيتها في السيناريوهات الواقعية، تقدم الدراسة متغيرات خارجية متعددة الأبعاد للاختبار التجريبي.

أولا، تحلل قرب الطرق المغمورة واتصالية الطرق الخارجية. فكثيرا ما يلغي السكان رحلاتهم عندما تنقطع مساراتهم بفعل غمر الطرق بالمياه. ومن المتوقع أن تتحمل الأحياء القريبة من الطرق المغمورة وذات خيارات المسارات المحدودة، والتي تترجم إجرائيا إلى ضعف اتصالية الطرق الخارجية، خسائر وظيفية وقيودا على التنقل أكبر تحت اضطراب الغمر بالمطر. ولاختبار هذه الفرضية، تبني الدراسة نطاقات عازلة للوصول سيرا إلى الطرق المغمورة باستخدام عتبات: أكثر من 15 دقيقة، و10-15 دقيقة، و5-10 دقائق، وأقل من 5 دقائق. ويستخدم اختبار كاي-تربيع لفحص دلالة العلاقة بين رتبة المرونة والقرب من الطرق المغمورة. وبالاستناد إلى نحو الفضاء، تستخدم مركزية التوسط، التي تمثل الأهمية البنيوية لشبكة الطرق، ومتوسط العمق الزاوي، الذي يمثل كفاءة تنظيم المسارات، لوصف اتصالية الطرق الخارجية. وتقسم الأحياء إلى مجموعتي اتصالية منخفضة ومرتفعة، ثم تجرى اختبارات كاي-تربيع طبقية لتحليل التفاعل بين القرب من الطرق المغمورة واتصالية الطرق الخارجية.

وتجدر الإشارة إلى أن ارتفاع الحي لا يدخل كمتغير تحقق رئيسي. فعلى الرغم من أن الارتفاع عامل فيزيائي تقليدي في توزيع الغمر، فإن علاقته بعمق المياه وقيود التنقل تتأثر بنظم الصرف، وسعة شبكات الأنابيب، والطبوغرافيا الدقيقة، ونفاذية التربة، وترتيبات الطوارئ، لذلك فهي ليست علاقة خطية بسيطة. كما أن ارتفاع الحي يعكس أساسا خطر تعرض الحي نفسه للغمر، لكنه ليس عاملا تفسيريا مباشرا لتأثر تنقل السكان بظروف الفيضان.

ثانيا، تستخدم البنية الديموغرافية على مستوى الناحية الفرعية للتحقق. ولاختبار ما إذا كانت بيانات إشارات الهاتف المحمول تحتوي على تحيز تمثيلي على مستوى الحي للفئات الهشة مثل كبار السن والأطفال وبعض السكان العائمين منخفضي الدخل، ولاستكشاف القدرة التفسيرية الاجتماعية للطريقة المقترحة، تقدم الدراسة بيانات البنية الديموغرافية على مستوى الناحية الفرعية من التعداد الوطني السابع للسكان في شنتشن. وتشمل هذه البيانات نسبة السكان في سن 65 عاما فأكثر، ونسبة الأطفال في سن 0-14 عاما، ومتوسط سنوات التعليم للسكان في سن 15 عاما فأكثر. ويستخدم تحليل ارتباط الرتب Spearman لاختبار قوة ودلالة العلاقة بين متوسط المرونة على مستوى الشارع والبنية الديموغرافية.



الشكل 2. طرائق البحث

تدمج الطريقة ثلاث وحدات: بناء قاعدة بيانات التنقل، وتقييم مرونة الأحياء تجاه أمطار السيول وتصنيفها، والتحقق من طريقة التقييم. وتقارن منحنيات التنقل أثناء الكارثة وفي غير أوقاتها، وتميز بين مرحلتي أثناء الكارثة وبعدها، وتطبق تصنيف المرونة بطريقة K-means، وتتحقق من النتائج عبر نطاقات الطرق المغمورة واتصالية الطرق الخارجية والبنية الديموغرافية على مستوى الناحية الفرعية.

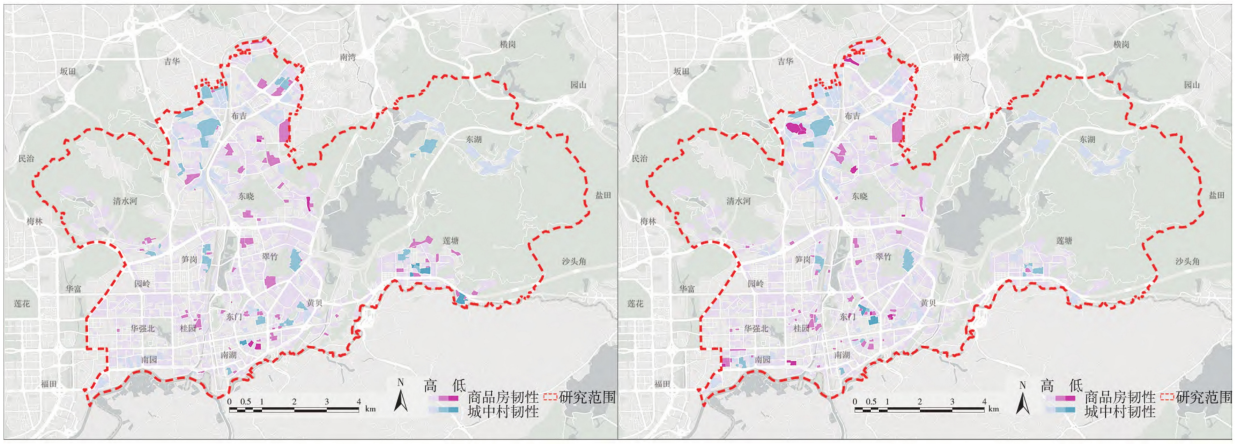
3. نتائج البحث

3.1 مستويات مرونة الأحياء أثناء الكارثة وبعدها

تبين نتائج عنقدة شدة اضطراب التنقل للفرد أثناء الكارثة وبعدها أن منحنيات مجموع مربعات الخطأ تظهر جميعها نقطة كوع عند k = 3، وأن معاملات الصورة الظلية تقع أيضا عند مستوى مرتفع نسبيا. لذلك تقسم مستويات المرونة أثناء الكارثة وبعدها إلى ثلاث درجات، وترمز بالأرقام 0 و1 و2 لتمثيل المرونة العالية والمتوسطة والمنخفضة، ثم تصنف الأحياء بحسب تركيب درجتي أثناء الكارثة وبعدها.

تظهر خرائط المرونة (الشكل 3) أن الأحياء منخفضة المرونة تتخذ نمطا مكانيا متصلا. وتتركز الأحياء منخفضة المرونة أثناء الكارثة أساسا في ناحية ليانتانغ بمنطقة لوهو، وفي مناطق الحدود بين نواحي دونغمن وهوانغبي ونانهو. وهذه المناطق منخفضة نسبيا، وقد لا تتمكن نظم الصرف فيها من تحمل أمطار قصيرة المدة عالية الشدة، ما يؤدي إلى غمر شديد يؤثر مباشرة في تنقل السكان. أما الأحياء منخفضة المرونة التي تظهر حديثا بعد الكارثة فتتركز أساسا في ناحية غوبيوان بمنطقة لوهو وناحية نانيوان بمنطقة فوتيان. وتقع هذه المناطق قرب تجمعات تجارية، وقد تتأثر بازدحام المرور وكثافة النشاط الاجتماعي الاقتصادي، بما يجعل اضطراب التنقل يستمر بعد العاصفة المطرية. وتتركز الأحياء ذات المرونة المنخفضة في المرحلتين معا في ناحية بوجي بمنطقة لونغغانغ، حيث تنتشر مجتمعات قديمة وقرى داخل المدينة. وتؤدي شيخوخة البنية الأساسية وعدم كفاية نظم الصرف إلى قابلية عالية للغمر، بما يفاقم اضطراب تنقل السكان المستمر أثناء الحدث وبعده. إضافة إلى ذلك، تظهر مناطق مثل سونغانغ وتشينغشويخه في لوهو تجمعات صغيرة متصلة، بينما تظهر قلة من الأحياء منخفضة المرونة في صورة حالات منفردة. وتعكس هذه الأنماط التأثير المحتمل لمستوى البنية الأساسية وكفاءة الحوكمة وفروق التضاريس في توزيع المرونة.

وتبين المقارنة العرضية بين المناطق أن الأحياء منخفضة المرونة في نطاق الدراسة تتركز أساسا في لوهو ولونغغانغ، بينما تضم فوتيان، ذات الظروف الاقتصادية الأفضل، عددا أقل بكثير من الأحياء منخفضة المرونة. وتعكس هذه النتيجة التأثير العميق لشكل الفضاء الحضري، والبنية الأساسية في البيئة المبنية، وتوزيع الموارد الاقتصادية في قدرة الأحياء على مقاومة الكوارث. وتظهر المقارنة بين الإسكان التجاري والقرى داخل المدينة أن الأحياء منخفضة المرونة هي في الغالب قرى داخل المدينة. فبعض القرى داخل المدينة أقل مرونة بوضوح من أحياء الإسكان التجاري المجاورة لها، ما يدل على نقص حاد في البنية الأساسية لجزء من البيئة المبنية في هذه القرى، ويبرز عيبها المروني ضمن الموقع الجغرافي نفسه.



الشكل 3. خرائط مرونة الأحياء السكنية

يعرض الشكل خرائط مرونة الأحياء أثناء الكارثة وبعدها، محددا المناطق المتصلة منخفضة المرونة وفروقها بين لوهو وفوتيان ولونغغانغ.

3.2 فروق المرونة أثناء الكارثة وبعدها بين أنواع الأحياء

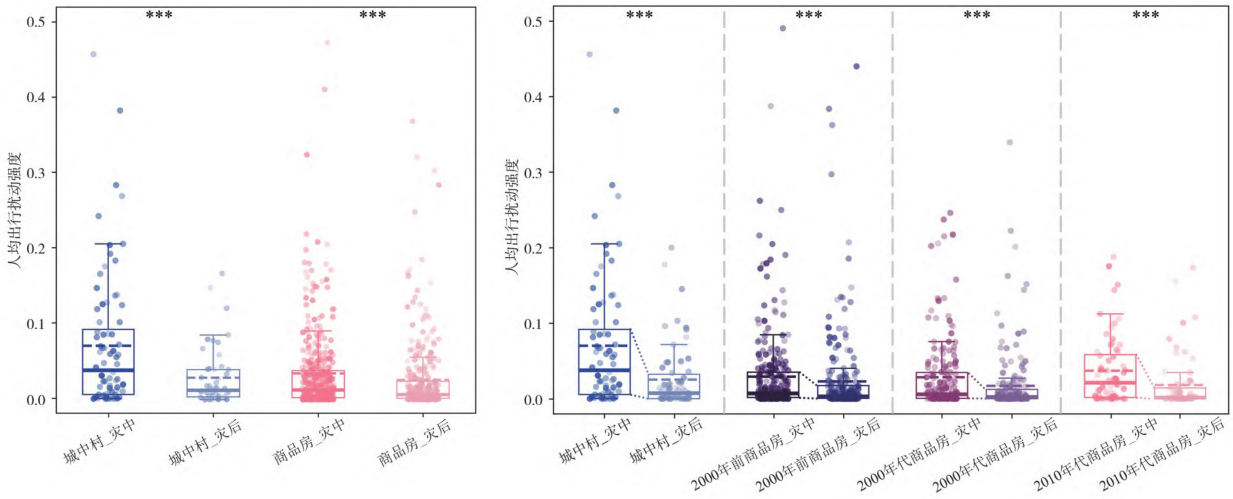
استنادا إلى نتائج تقييم المرونة، تنشئ الدراسة مخططات صندوقية وتوزيعات نقطية لتحليل تغيرات المرونة بين أنواع مختلفة من الأحياء أثناء الكارثة وبعدها، بما يكشف خصائصها المرونية المتباينة (الشكل 4).

تظهر القرى داخل المدينة مستوى أدنى من المرونة عموما أثناء الكارثة وبعدها. ويبين المخطط الصندوقي أن الشارب العلوي لاضطراب أثناء الكارثة يمتد كثيرا، وأن عدة عينات ذات اضطراب شديد للغاية توسع نطاق التوزيع (الشكل 4(a)). وقد يعزى ذلك إلى

نقص البنية الأساسية وقلة الموارد الاجتماعية، ما يضخم آثار الكارثة. وعلى الرغم من انخفاض الاضطراب بعد الكارثة، فإنه يبقى مرتفعا نسبيا ويقترب من مستوى اضطراب أحياء الإسكان التجاري أثناء الكارثة، ما يشير إلى آثار متأخرة أقوى في مرحلة التعافي في القرى داخل المدينة. وفي المقابل، يكون وسيط اضطراب أثناء الكارثة في أحياء الإسكان التجاري أدنى، وإن كان المخطط النقطي يظهر بعض العينات منخفضة المرونة. وينخفض اضطرابها بعد الكارثة بدرجة واضحة، وقد يعود ذلك إلى بنية أساسية أفضل ودعم كاف من الموارد الاجتماعية يسمحان بتعاف أكثر كفاءة.

ويبين المخطط الصندوقي بحسب فترة البناء (الشكل 4(b)) أن أحياء الإسكان التجاري المنشأة قبل عام 2000 وتلك المنشأة بين 2000 و2010 تتشابه في المرونة الإجمالية. غير أن المخطط النقطي يكشف عن عينات أكثر انخفاضا في المرونة بين أحياء ما قبل 2000، ربما بسبب تقادم البنية الأساسية وقصور الدعم الاجتماعي. وتتعافى أحياء الإسكان التجاري المنشأة بين 2000 و2010 بسرعة أكبر بعد الكارثة، مستفيدة من تحسن معايير التخطيط والترقي التدريجي للبيئة المبنية. أما الأحياء المنشأة بعد 2010 فتظهر أعلى وسيط لاضطراب التنقل أثناء الكارثة ومدى ربيعيا أكبر، لكنها تضم أقل عدد من العينات النقطية منخفضة المرونة وتتعافى بأسرع وتيرة بعد الكارثة. ويتسق هذا النمط مع بنية أساسية أفضل وتوزيع موارد أكثر ملاءمة.

وعلى الرغم من أن الافتراض التقليدي يرى علاقة إيجابية بين فترة البناء وجودة الحي والمرونة، فإن هذه الدراسة تجد أن فروق المرونة أثناء الكارثة تكشف تباينا غير خطي في قدرة المقاومة وآليات استجابة السكان تحت صدمة المطر الشديد. وبوجه عام، ينبغي أن يتجاوز تقييم مرونة الأحياء مؤشرات البيئة المبنية المفردة، وأن ينظر في التغيرات الدينامية بين مقاومة أثناء الكارثة وتعاف بعد الكارثة. وتبرز المرونة المنخفضة للقرى داخل المدينة أهمية السمات الاجتماعية الاقتصادية وتوزيع موارد الطوارئ، في حين تكشف الفروق بين فترات بناء الإسكان التجاري أثر تطور البنية الأساسية.



(a) 城中村与商品房韧性对比

(b) 城中村与各个年代的商品房韧性对比

الشكل 4. المخطط الصندوقي والتوزيع النقطي لمستويات مرونة الأحياء السكنية

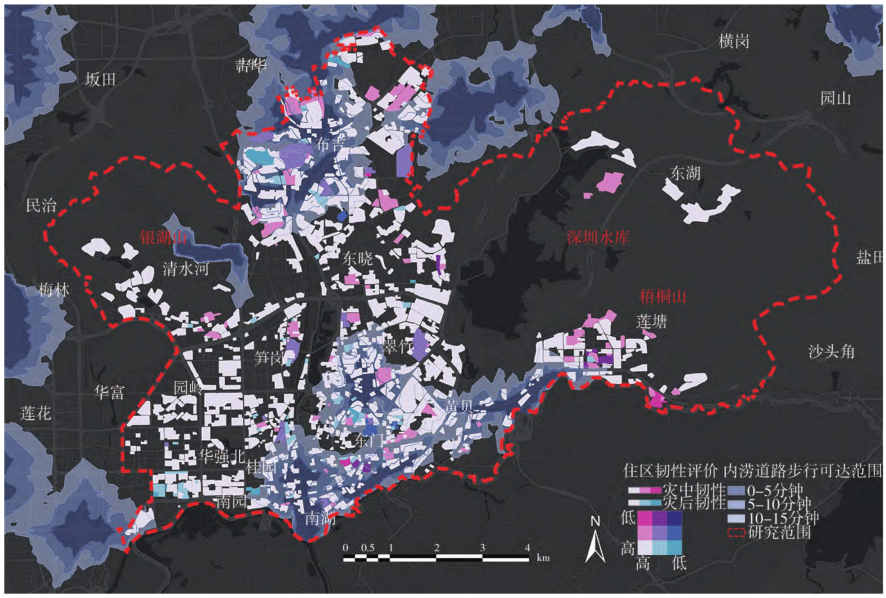
يقارن الشكل المرونة بين القرى داخل المدينة وأحياء الإسكان التجاري، ثم يقارن القرى داخل المدينة بأحياء الإسكان التجاري المنشأة في فترات مختلفة.

3.3 التحقق من نتائج تقييم مرونة الأحياء

تظهر نتائج اختبار كاي-تربيع (الشكل 5) أن مرونة أثناء الكارثة ترتبط دلاليا بمسافة المشي إلى الطرق المغمورة بالمياه (chi-square = 14.5216, P = 0.0243 < 0.05). فالأحياء الأقرب إلى الطرق المغمورة لديها احتمال أعلى بكثير للوقوع في فئة المرونة المنخفضة أثناء الكارثة. أما العلاقة بين مرونة ما بعد الكارثة ومسافة المشي إلى الطرق المغمورة فليست دالة (chi-square = 12.0748, P = 0.0603 > 0.05)، ولا تظهر سوى اتجاه هامشي. وتدعم هذه النتيجة صلاحية طريقة التقييم، إذ تتأثر مرونة أثناء الكارثة مباشرة بغمر الطرق، بينما تتأثر مرونة ما بعد الكارثة بعوامل أخرى.

تقسم اختبارات كاي-تربيع الطبقية الأحياء إلى مجموعتي اتصالية منخفضة ومرتفعة بحسب وسيط الاتصالية الخارجية. وتظهر النتائج أنه في مجموعة الاتصالية المنخفضة توجد علاقة دالة بين مرونة أثناء الكارثة ومسافة المشي إلى الطرق المغمورة (chi-square = 15.8262, P = 0.01472 < 0.05). أما في مجموعة الاتصالية المرتفعة فليست العلاقة دالة (chi-square = 9.0223,

0.05 < P = 0.1723)، ما يشير إلى أن أثر الغمر يضعف عندما تكون الاتصالية الخارجية عالية. وبالنسبة لمرونة ما بعد الكارثة، لا تظهر علاقة دالة مع مسافة المشي إلى الطرق المغمورة لا في مجموعة الاتصالية المنخفضة (chi-square = 10.8070, P = 0.0945 < 0.05) ولا في مجموعة الاتصالية المرتفعة (chi-square = 7.3557, P = 0.2892 > 0.05). وتكشف هذه النتائج أن اتصالية الطرق الخارجية عامل معدل مهم لأثر الطرق المغمورة في مرونة أثناء الكارثة. فالأحياء منخفضة الاتصالية أكثر عرضة لقيود تنقل شديدة عندما تغمر الطرق القريبة، بينما تستطيع الأحياء عالية الاتصالية تخفيف الأثر عبر مسارات بديلة وممرات تصريف. وتثبت النتائج مجتمعة أن الطريقة المقترحة قادرة على التقاط الأثر المتباين للطرق المغمورة في مرونة الأحياء المحيطة أثناء الكارثة.



الشكل 5. التحقق باستخدام نطاقات عازلة طبقية حول الطرق المغمورة بالمياه

يتحقق الشكل من العلاقة بين مرونة الحي ومسافة المشي إلى الطرق المغمورة واتصالية الطرق الخارجية أثناء الكارثة وبعدها.

ترد نتائج ارتباط الرتب Spearman بين مؤشرات متوسط المرونة على مستوى الناحية الفرعية ومتغيرات البنية الديموغرافية في الجدول 2. وتظهر أن مؤشر اضطراب أثناء الكارثة يرتبط ارتباطات ضعيفة وغير دالة بنسبة كبار السن، ونسبة الأطفال، ومتوسط سنوات التعليم. أما في مرحلة ما بعد الكارثة، فترتبط شدة الاضطراب ارتباطا سلبيا دالا بنسبة كبار السن ومتوسط سنوات التعليم، وارتباطا سلبيا ضعيفا بنسبة الأطفال. ويعني ذلك أن اضطراب التنقل أثناء الكارثة أقل حساسية لتحيز البنية الديموغرافية، وأنه مدفوع أساسا بانقطاع فيزيائي مفاجئ؛ أما أثر اختفاء الفئات الهشة من بيانات التنقل فلم يتضخم بعد على نحو واضح. وفي مرحلة ما بعد الكارثة تقوى الارتباطات، ما يدل على أن الطريقة تلتقط حساسية اجتماعية اقتصادية أقوى في عملية التعافي المتأخر، ويمكنها أن تعكس جزئيا الآثار المتباينة للبنية الديموغرافية في الاضطراب المتأخر. فعلى سبيل المثال، تظهر النواحي ذات المستويات التعليمية الأعلى، بما يدل على قلة نسبية للسكان منخفضي الدخل، مرونة أعلى بعد الكارثة.

غير أن الارتباط السلبي الدال مع نسبة كبار السن يشير إلى وجود تحيز تمثيلي معين في بيانات إشارات الهاتف المحمول على مستوى الحي. فبسبب انخفاض تغطية كبار السن في العينة، تسهم تخفيضات التنقل في بعض الأحياء، مثل يوانلينغ وتسويتشو، إسهاما ضعيفا في اضطراب العينة الكلية. وقد ينتج عن ذلك وهم إحصائي يظهر الأحياء ذات كبار السن الأكثر كما لو أنها أكثر مرونة. وبعبارة أخرى، قد يؤدي الاعتماد على بيانات إشارات الهاتف المحمول وحدها إلى التقليل من تقدير المخاطر الحقيقية التي تواجه الفئات الهشة. وينبغي أن تدمج الدراسات المستقبلية بيانات تعداد أو مسوح عينية على مستوى المجتمع المحلي للمعايرة، بحيث يصبح تقييم المرونة أكثر شمولا.

الجدول 2. تحليل الارتباط بين متوسط المرونة على مستوى الناحية الفرعية ومتغيرات البنية الديموغرافية عبر مراحل مختلفة

متغير البنية الديموغرافية	شدة اضطراب التنقل للفرد أثناء الكارثة	شدة اضطراب التنقل للفرد بعد الكارثة
نسبة السكان في سن 65 عاما	0.152-	*0.530-

فأكثر		
نسبة الأطفال في سن 0-14 عاما	0.007-	0.380-
متوسط سنوات التعليم للسكان في سن 15 عاما فأكثر	0.099-	*0.582-

ملاحظة: تشير * إلى دلالة عند مستوى 0.05 (ثنائي الطرف).

4. المناقشة والاستنتاجات

4.1 الاستنتاجات الرئيسية والقيمة العملية

تبني هذه الدراسة إطارا لتقييم مرونة الأحياء السكنية تجاه أمطار السيول استنادا إلى اضطراب تنقل السكان في الزمان والمكان أثناء العواصف المطرية، وتختبره تجريبيا باستخدام عاصفة شنتشن المطرية القصوى "9.7". ومن خلال تحليل بيانات إشارات هاتف محمول من نحو مليون جهاز مجهول الهوية، تبني الدراسة منحنيات لتقلب التنقل قبل الكارثة وبعدها، وتقيس مستويات المرونة أثناء الكارثة وبعدها، وتنتج خرائط مرونة على مستوى الحي. وقد تم التحقق من صلاحية الطريقة باستخدام بيانات فعلية عن الطرق المغمورة وبنية ديموغرافية.

تظهر النتائج أن أحياء الإسكان التجاري أكثر مرونة من القرى داخل المدينة، وأن أحياء الإسكان التجاري المنشأة في فترات مختلفة تظهر أيضا تباينا واضحا في المرونة. ويؤكد تحليل الارتباط المستند إلى الطرق المغمورة أن غمر الطرق عامل مهم في اضطراب تنقل السكان أثناء الكوارث، ويثبت فاعلية الإطار في تحديد الفروق المكانية في مرونة الأحياء. وفي الوقت نفسه، يكشف التحقق الديموغرافي باستخدام البنية السكانية على مستوى الشارع أن بيانات إشارات الهاتف المحمول قد تحتوي على تحيز داخلي عند استخدامها في تقييم المرونة على المقياس الدقيق، بما قد يقلل من تقدير المخاطر الحقيقية في الأحياء المتقدمة في العمر سكانيا.

تركز معظم تقييمات مرونة الكوارث القائمة على التقييم الساكن على المستوى الكلي. وتحقق هذه الدراسة حكما دقيقا على مستوى الحي، وتبرز مزايا التحليل الديناميي المتصل زمنيا القائم على خصائص تنقل السكان. وبالمقارنة مع الدراسات القائمة التي تستخدم البيانات الضخمة ومنحنيات المرونة، يوفر التحسين التكيفي المقترح هنا منظورا أكثر تبصرا لفهم التباين الزماني المكاني في مرونة المدن تجاه أمطار السيول ولدعم حوكمة الطوارئ. وخلافا لتحليل السيناريوهات المعتمد على الارتفاع، لا تتحقق هذه الدراسة فقط من العلاقة الدالة بين مرونة أثناء الكارثة والقرب من الطرق المغمورة، بل تجد أيضا أن الأحياء منخفضة المرونة لا تقتصر على مسافة ثابتة من هذه الطرق (الشكل 5). وفي الوقت نفسه، وعلى الرغم من أن الأحياء منخفضة الارتفاع تعد تقليديا مناطق عالية الخطر، فإن الدراسة تجد أن هذا الافتراض لا يطابق تماما اضطراب التنقل الفعلي للسكان. فبعض الأحياء الواقعة قرب السفوح، على سبيل المثال، ذات تضاريس مرتفعة نسبيا لكنها منخفضة المرونة بسبب محدودية خيارات الطرق. وبذلك يستطيع التقييم الديناميي القائم على التنقل التقاط آثار أكثر تعقيدا قد تغفلها التقييمات التقليدية.

وتستجيب هذه الدراسة أيضا لقضية العدالة الاجتماعية في بحث المرونة الحضرية. إذ تشير دراسات قائمة [15] إلى أن الأحياء المحرومة اجتماعيا واقتصاديا تكون غالبا أقل مرونة. ومن خلال مقارنة الأحياء بحسب فترات البناء وأنواع الملكية، تؤكد هذه الدراسة مرة أخرى العلاقة بين العوامل الاجتماعية الاقتصادية والمرونة. فهي تعكس الفروق الواقعية في مرونة الأحياء الناتجة عن نقص البنية الأساسية وعدم تكافؤ توزيع الموارد أثناء مقاومة الكارثة والتعافي منها. كما تقدم خرائط المرونة على مستوى الحي تمثيلا أكثر دقة لمستوى المرونة على المقياس الحضري الدقيق.

4.2 مقترحات لإدراج تقييم المرونة في الفحص الحضري على مستوى الأحياء

وفقا لوثائق سياسات مثل الدليل الفني للفحص والتقييم الحضري في التخطيط المكاني الإقليمي، أصبح الفحص الحضري أداة مؤسسية مهمة لدفع التنمية الحضرية عالية الجودة وسد نواقص بيئة السكن. وتمثل المرونة بعدا مهما في الفحص الحضري الحالي. واستجابة لنقص الطرائق المنهجية للتقييم الديناميي الدقيق للمرونة على مستوى الحي، تقترح هذه الدراسة إجراء للفحص والتقييم الخاص بمرونة الأحياء تجاه أمطار السيول مدفوعا ببيانات إشارات الهاتف المحمول. ويمكن تجريبه وتعميمه داخل منظومة الفحص الحضري.

وفي مجال التجديد الحضري وإدارة طوارئ كوارث الأحياء، يتضمن الإجراء جمع البيانات، وبناء خط الأساس، وتقسيم مراحل الكارثة، وقياس الاضطراب، والتحقق الخارجي. ويمكن تغذية نتائج التشخيص الراجعة في منصات معلومات الفحص الحضري، ثم إدماجها أكثر في إعداد خطط التجديد الحضري. فعلى سبيل المثال، يمكن إدراج الأحياء منخفضة المرونة في قواعد بيانات مشروعات التجديد الحضري، ومواءمتها مع التجديد الدقيق التدريجي، وسد فجوات البنية الأساسية الزرقاء والخضراء، وبناء آليات التنسيق المجتمعي للطوارئ. وبهذا يمكن تشكيل مسار حوكمة مغلق الحلقة يتكون من "الفحص والتقييم - التشخيص والتحديد - التصحيح الموجه حسب الأولويات - الرصد الديناميي"، بما يدعم الرصد الروتيني والإنذار المبكر وصنع القرار التخطيطي المستدام المدفوع بالبيانات.

4.3 حدود البحث وآفاقه المستقبلية

لا يعكس انخفاض حجم تنقل السكان وحده تضرر وظائف نظام الحي. فمؤشر شدة اضطراب التنقل المستخدم في هذه الدراسة لا يميز بين التنقل الإلزامي المعاق والتنقل المرن الذي يتم تجنبه طوعا، ما قد يؤدي إلى التقليل من تقدير مرونة الأحياء ذات القدرة الحوكمية العالية. ويمكن للبحوث المستقبلية تطوير منصات لدمج بيانات متعددة المصادر تشمل نقاط الاهتمام، واستخدامات الأرض، والاستشعار عن بعد بالأقمار الصناعية، وإشارات الهاتف المحمول، ووسائل التواصل الاجتماعي. كما يمكن استخدام التنبؤ بالسلاسل الزمنية LSTM أو الشبكات العصبية البيانية لتجميع مسارات التنقل والفصل الكمي بين تقلبات الحركة الإلزامية والمرنة، بما يوفر دعما قراريا أكثر توجيها لحوكمة المرونة.

إن المؤشر المركزي V1 مفيد في الكشف عن قدرة الأحياء على تحمل الاضطراب التراكمي الناجم عن المطر الشديد، إلا أن مؤشرا واحدا لا يستطيع تحقيق توازن كاف بين الخطر الحاد والخسارة التراكمية طويلة الأجل. ويمكن للدراسات المستقبلية بناء مؤشرات مركبة تدمج معدل الفقد الأقصى لالتقاط شدة التدمير القصوى والخطر الحاد، وتجمع بين ميل التعافي وعنقدة شكل المنحنى لتحسين دقة التقييم، مع التمييز بين آليات مقاومة الخطر الحاد وقدرة التعافي طويلة الأجل في الأحياء المختلفة.

الملاحظات

[1] أزيلت معظم نقاط الغمر خلال 48 ساعة، وانخفضت شدة الاستجابة الطارئة بوضوح. وعادت إمدادات المياه والكهرباء والاتصالات وغيرها من البنى الأساسية الحرجة إلى الوضع الطبيعي بالكامل خلال 72 ساعة. المصدر: مكتب شنتشن للأرصاد الجوية (المرصد)، "التحرك مع الريح، ومقاومة الرياح والمطر، وبناء خط الدفاع الأول للمدينة في الوقاية من الكوارث والحد منها: سجل استجابة مكتب شنتشن للأرصاد الجوية لإعصار ساولا وعاصفة '9.7' المطرية الشديدة القصوى".

المراجع

[1] CHEN Yi, CHEN Ruishan, GE Yi. بحوث وتأملات حول الهشاشة الاجتماعية والمرونة تجاه كوارث الفيضانات في المجتمعات الحضرية الصينية[J]. Urbanism and Architecture, 2018(35): 32-34.

[2] CHEN Xunlai, XU Ting, WANG Rui, et al. الخصائص الرصدية الدقيقة وأسباب عاصفة "9.7" المطرية القصوى في دلتا نهر اللؤلؤ[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2024, 35(1): 1-16.

[3] WEI Zongcai, LIN Yudong, WEN Xiaolan, et al. تقدم بحوث المرونة الحضرية في ظل المناخ المتطرف في الصين وخارجها: الأطر المفاهيمية والقياس واستراتيجيات التحسين[J]. Planners, 2025, 41(7): 10-17.

[4] CUTTER S L, FINCH C. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2008, 105(7): 2301-2306.

[5] BALICA S F, WRIGHT N G, VAN DER MEULEN F. A flood vulnerability index for coastal cities and its use in assessing climate change impacts[J]. Natural Hazards, 2012, 64: 73-105.

[6] ZHANG Xiaorui, ZHANG Linya, FANG Chuanglin. المفهوم والإطار والقياس: مراجعة لمسار بحوث الهشاشة الحضرية وتوسيعها[J]. Geography and Geo-Information Science, 2015, 31(4): 94-99.

[7] CUTTER S L, BORUFF B J, SHIRLEY W L. Social vulnerability to environmental hazards[J]. Social Science Quarterly, 2003, 84(2): 242-261.

[8] CUTTER S L, BURTON C G, EMRICH C T. Disaster resilience indicators for benchmarking baseline conditions[J]. Journal of Homeland Security and Emergency Management, 2010, 7(1): 51.

[9] CUTTER S L, ASH K D, EMRICH C T. The geographies of community disaster resilience[J]. Global Environmental Change, 2014, 29: 65-77.

TIMMERMAN P. Vulnerability, resilience and the collapse of society: a review of model's possible [10] .climatic applications[R]. Toronto: Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981
ZHAI Guofang. الاستجابات المرنة لكوارث أمطار السيول الحضرية من منظور التخطيط في سياق تغير المناخ: مفاهيم [11] رئيسية وأفكار أساسية وإطار عام2024 ,Urban Planning Forum. [J](1): 29-37.
HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and [12] .23-1 :4 ,Systematics, 1973
,ADGER W N. Social and ecological resilience: are they related?[J]. Progress in Human Geography [13] .364-347 ,2000 ,24(3):
FOLKE C, CARPENTER S, WALKER B, et al. Regime shifts, resilience, and biodiversity in ecosystem [14] .581-557 :(1)35 ,management[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2004
SHARIFI A, YAMAGATA Y. Urban resilience assessment: multiple dimensions, criteria, and [15] :indicators[M]//YAMAGATA Y, SHARIFI A. Urban resilience: a transformative approach. Cham .Springer, 2016
MEEROW S, NEWELL J P, STULTS M. Defining urban resilience: a review[J]. Landscape and Urban [16] .49-38 :147 ,Planning, 2016
SPAANS M, WATERHOUT B. Building up resilience in cities worldwide: Rotterdam as participant in [17] .116-109 :61 ,the 100 Resilient Cities Programme[J]. Cities, 2017
GUO Renzhong, YANG Xiaochun, HONG Wuyang, et al. المنطق الأساسي والإطار العام لتخطيط وتصميم المدن [18] الآمنة والمرنة2025 ,Strategic Study of CAE. [J], 27(4): 28-42.
CHEN Bilin, LI Yinglong. تقييم تخطيط التحول التكيفي للمدن الساحلية عالية الكثافة الموجه نحو مرونة الفيضانات: [19] دراسة حالة منطقة غابات المانغروف في خليج شنتشن2023 ,Urban Planning Forum. [J](4): 77-86.
.LIU C, XU F, GAO C, et al. Deep learning resilience inference for complex networked systems[J] [20] .9203 :(1)15 ,Nature Communications, 2024
FAN Yating, LI Yuefan, TU Wei, et al. تقييم هشاشة الحوامل الحضرية للكوارث بدعم من بيانات وسائل التواصل [21] الاجتماعي: دراسة حالة الطقس المتطرف في شنتشن2024 ,City Planning Review. [J], 48(08): 101-113.
HSU C W, MOSTAFAVI A. Dissecting resilience curve archetypes and properties in human systems [22] .11897 :(1)15 ,facing weather hazards[J]. Scientific Reports, 2025
ZHANG F, LI Z, LI N, et al. Assessment of urban human mobility perturbation under extreme weather [23] .101671 :50 ,events: a case study in Nanjing, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019
TANG J, ZHAO P, GONG Z, et al. Resilience patterns of human mobility in response to extreme urban [24] .nwad097 :(8)10 ,floods[J]. National Science Review, 2023
BRUNEAU M, CHANG S E, EGUCHI R T, et al. A framework to quantitatively assess and enhance the [25] .752-733 :(4)19 ,seismic resilience of communities[J]. Earthquake Spectra, 2003
HONG B, BONCZAK B J, GUPTA A, et al. Measuring inequality in community resilience to natural [26] .1870 :(1)12 ,disasters using large-scale mobility data[J]. Nature Communications, 2021
OUYANG M, DUEÑAS-OSORIO L, MIN X. A three-stage resilience analysis framework for urban [27] .31-23 :36 ,infrastructure systems[J]. Structural Safety, 2012
REED D A, KAPUR K C, CHRISTIE R D. Methodology for assessing the resilience of networked [28] .180-174 :(2)3 ,infrastructure[J]. IEEE Systems Journal, 2009
QIAN J, DU Y, LIANG F, et al. Measuring community resilience inequality to inland flooding using [29] .104915 :149 ,location aware big data[J]. Cities, 2024

[30] YAN Wentao, REN Jie, ZHANG Shangwu, et al. تخطيط مدينة شنغهاي المرنة: القضايا الرئيسية والإطار العام واستراتيجيات التخطيط[J]. Urban Planning Forum, 2022(3): 19-28.
[31] YANG Junyan, CAO Jun. الديناميي والساكن والظاهر والخفي: أربعة أنماط لتطبيق البيانات الضخمة في التصميم الحضري[J]. Urban Planning Forum, 2017(4): 39-46.
[32] PENG Chong, ZUO Peiwen, LI Yuewen, et al. اقتران المخاطر المتعددة في الفضاء الحضري واستجابات التخطيط المرن[J]. Urban Planning Forum, 2024(5): 88-97.
[33] PAN Haixiao, DAI Shenzhi, ZHAO Yanjing, et al. حوار أكاديمي حول "المرونة الحضرية والتخطيط المكاني استجابة لتغير المناخ"[J]. Urban Planning Forum, 2021(5): 1-10.
[34] NAN C, SANSAVINI G. A quantitative method for assessing resilience of interdependent infrastructures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2017, 157: 35-53.
[35] POULIN C, KANE M B. Infrastructure resilience curves: performance measures and summary metrics[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 216: 107926.

ترجمة بمساعدة الذكاء الاصطناعي