

干旱区绿洲城镇扩张对耕地空间影响及预测 ——以河西走廊区域为例

孙钦珂^{1,2}, 周亮^{1,2,3}, 唐相龙⁴, 孙东琪³, 党雪薇^{1,2}

(1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院, 兰州 730070; 2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心, 兰州 730070; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 兰州交通大学建筑与城市规划学院, 兰州 730070)

摘要: 绿洲城镇是干旱地区人类活动最剧烈、人口集聚度最高、“人—地”关系矛盾最为突出的生态环境脆弱区。受全球气候变化影响及西部大开发战略推动, 区域城镇与绿洲耕地之间的动态变化及利弊权衡成为当前关注的热点。基于 1990—2015 年多时相遥感影像数据, 以典型绿洲城镇河西走廊为研究区, 引入 Markov 和 ANN-CA 模型对河西走廊城镇用地与耕地的时空动态转换特征与规律展开探索, 揭示了城镇扩张对耕地的影响过程与机制。研究表明: (1) 河西走廊土地总体以未利用土地和草地为主, 城镇用地与耕地仅占区域总面积的 0.63%、6.35%, 且城镇与耕地面积共同经历了先减少后增加的“V”型变化趋势。(2) 1990—2015 年河西走廊城镇面积扩张了 1.53 倍, 其中 15.67% 的城镇扩张用地来自耕地占用, 其他主要来源于草地、沙漠和戈壁等未利用土地。另外, 区域内 5 个地市城镇扩张的耕地占用差异较大。(3) 结合 Markov 与 ANN-CA 模型的模拟和预测结果表明, 2015—2030 年河西走廊 79.77% 的城镇扩张用地将来源于周边耕地, 且城镇空间扩张方式以外延扩展为主, 未来耕地被城镇侵占压力较大。研究结果将为干旱区相似区域空间规划和耕地保护提供决策支持。

关键词: 城镇扩张; 耕地流失; CA; 空间规划; 可持续发展

21 世纪是城市驱动的世纪^[1], 全球城市化的趋势下实现城市化与资源环境的可持续发展是实现人类可持续发展的必要基础。为此, 国家科学组织和科学研究计划开展了一系列卓有成效的研究。“国际地圈与生物圈计划 (International Geosphere-Biosphere Program, IGBP)” 和 “国际全球环境变化人文计划 (International Human Dimensions of Global Environmental Change Programs, IHDP)” 联合发起土地利用/覆被变化研究项目^[2], 后逐渐演变成未来地球计划 (Future Earth)。“未来地球在中国” 国际会议上讨论的城市扩展与环境的问题以及联合国 SDGs 目标的设定均表明城市发展与城市体系空间重构、城市化与资源环境交互影响及可持续发展是全球化的城市热点问题。中国自改革开放以来经历了快速的城镇化发展, 城镇用地的扩张对生态环境及耕地造成严重的影响^[3,4]。1987—2000 年中国因城镇扩张造成的耕地损失比例达到 45.96%, 2000—2010 年比例上升到 55.44%^[5]。2050 年世界城镇人口比例将超过 60%^[6], 人类对粮食的需求加剧生态空间的破解, 使得城镇—耕地—生态矛盾空间突出^[7-10]。伴随着干旱区城镇化的不断扩张,

收稿日期: 2019-11-08; 修订日期: 2020-02-19

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41701173, 41961027); 教育部人文社会科学研究青年基金项目 (17YJCZH268)

作者简介: 孙钦珂 (1995-), 男, 山东济宁人, 硕士, 研究方向为城市遥感。E-mail: qksun2018@163.com

通讯作者: 周亮 (1983-), 男, 甘肃天水人, 博士, 教授, 研究方向为城市可持续发展。E-mail: zhougeo@126.com

干旱区耕地及生境必将遭受更大破坏。因此，保护生态环境的背景下科学理解城镇扩张与耕地之间的关系，是干旱区城镇及生态可持续发展的重要基础。

河西走廊作为丝绸之路经济带畅通与复兴的重要支撑点^[11]，是干旱地区人类活动最集中，人地关系矛盾最突出的区域^[12,13]。随着“一带一路”倡议、西部大开发等国家战略的推进，丝绸之路沿线的干旱地区建设用地需求不断增加^[14,15]，与耕地之间的矛盾也将变得更加复杂。已有研究在内容上多集中于以干旱区单个或多个城镇为对象展开的城镇扩张特征与规律研究^[16,17]，或者干旱区耕地扩张原因和耕地数量及规模测算研究^[18,19]、干旱区城镇化发展与耕地的协同保护和分析^[20]。研究方法上多采用经验统计模型（Empirical Statistical Models）^[21]、自上而下的系统动力学模型（System Dynamic Models, SD）^[22]、自下而上的元胞自动机模型（Cellular Automata, CA）^[23]以及基于Agent的模型^[24]对城市空间增长进行模拟和预测。归纳总结发现，随着干旱区城镇化方面相关研究人才流失和研究方向的变化，干旱区绿洲城镇扩张与耕地保护复杂人地关系的研究进展相当缓慢，相关成果较少；另一方面CA模型虽在城市空间增长、扩散和土地利用演化模拟方面研究最为深入，但其模拟城镇空间增长时仅考虑邻域空间效应^[25]且不能用于多土地类型情景的模拟。因此，本文采用可从土地利用数据与包含自然作用与人类活动共同影响下的多种驱动因子中快速获取各类用地类型的适宜性概率的人工神经网络算法（Artificial Neural Network, ANN）与CA结合起来的模型^[26]，围绕“城镇—耕地”空间矛盾问题，系统对干旱地区城镇与耕地的关系展开研究。

科学认识河西走廊城镇扩张与耕地的关系，掌握其历史时空动态和预测未来变化的模式是必要的。在西部大开发、新型城镇化及“一带一路”倡议影响下，河西走廊城镇与绿洲耕地发生了剧烈变化。本文基于多时相遥感土地利用数据，量化并分析河西走廊城镇用地及耕地的时空演化特征，揭示河西走廊城镇扩张的主要贡献来源及在不同行政层面耕地损失的差异，并通过Markov和ANN-CA结合模型预测城镇扩张造成的耕地损失的变化趋势，以期更好地为干旱区“三线冲突”“空间规划”及耕地保护提供参考依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究区概况

河西走廊是丝绸之路的枢纽路段，为西北—东南走向的狭长平地，因地处黄河以西且形如走廊而得名。河西走廊是大陆性干旱气候区，降水量少且蒸发量大，是典型的生态环境脆弱区。尽管河西走廊地区年降水量约为200 mm，但日照条件充足且在祁连山融雪的灌溉下，适宜农作物的生长及物质积累，因此也是西北地区最主要的农业区和全国商品粮基地。河西走廊区域面积约占甘肃省总面积的2/3。由于近年来河西走廊交通设施及城镇的快速发展，河西五市的人口密度已两倍于联合国拟定的干旱地区人口承载力的极限（联合国的标准为7人/km²），严重影响到河西走廊地区生态和城镇的可持续发展。

1.2 数据来源

研究数据主要包括以下两个部分：（1）土地利用数据，研究选取1990—2015年每

五年间隔共六期的土地利用数据,数据的分辨率为100 m×100 m,来源于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn>)。该土地利用数据是在Landsat 遥感影像的基础上解译而成,其中2015年的数据是在遥感数据Landsat 8的基础上解译,1990—2010年间的的数据是TM/ETM的基础上解译,被认为是目前中国土地利用遥感监测数据产品里精度最高的产品之一^[27]。数据在耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用土地一级类型上的解译精度综合评价达到94.30%以上,并且在图斑尺度的精度为98.70%,数据解译精度较高^[28]。(2) 模拟预测的影响因子数据包括自然因子和社会因子。其中,自然因子有DEM、Slope和水体;社会因子涉及人口、GDP和交通距离等数据。自然因子中的DEM数据是基于ASTER的影像数据提取的研究区的高程数据,Slope数据是在DEM数据的基础上经ArcGIS软件处理成,河西走廊的水体数据可从国家基础地理信息中心获取。为匹配长时间序列的土地利用数据,社会因子数据中的人口和GDP数据从资源环境科学数据中心获取,1990—2015年每隔5年的中国人口和GDP公里网格数据集^[29,30]并裁剪出研究区的数据。铁路和高速公路等交通路网数据来源于OpenStreetMap,并通过ArcGIS软件裁剪至研究范围内。需要注意的是,研究所需的水体和交通的可达性要通过欧氏距离计算。此外,按照CA模型的输入规则,研究区所有影响因素数据的时空范围和数据的量纲需要保持一致,将所有输入数据的空间分辨率重采样为与土地利用数据相同的分辨率,并进行归一化处理。

1.3 研究方法

(1) 土地利用转移矩阵:土地利用转移矩阵通过计算不同时间段和不同土地利用类型的数据得到不同时段各类土地面积之间的转换信息,具有时空的量化性特征。因此研究采用土地利用转移矩阵定量化河西走廊地区土地利用变化特征,并得到各用地类型相互转换的动态数据^[31]。本文对河西走廊6期土地利用数据进行计算,具体公式如下所示:

$$S_{ab} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & \cdots & S_{2n} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & \cdots & S_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S 代表土地面积(km^2); a 代表研究区前一时期的土地利用类型; b 代表研究区后一时期的土地利用类型; n 代表土地利用的类型。矩阵对角线上的值表示不同时期同一类型的土地利用的面积变化情况。

(2) 贡献率指数(Contribution Rate, CR):确定耕地的转换与城镇扩张之间的关系,描述耕地对城镇的贡献程度,采用贡献率指数剖析城镇对耕地的占用情况。

$$CR = \frac{CL_{t \rightarrow t+n}}{UE_{t \rightarrow t+n}} \times 100\% \quad (2)$$

式中: CR 表示耕地对城镇扩张的贡献率(%); $UE_{t \rightarrow t+n}$ 表示 t 年到 $t+n$ 年城镇用地扩张的面积(km^2); $CL_{t \rightarrow t+n}$ 表示 t 年到 $t+n$ 年城镇用地扩张占用的耕地面积(km^2)。

(3) 马尔可夫链模型(Markov Chain, MC):MC模型可表示有限时序中前一时刻和后一时刻状态之间的关系,且状态之间具有无后效性特征。因此可通过前一时刻的状

态来预测后一时刻（未来状态）的变化。在土地利用变化研究中后一时刻的土地利用类型的变化是在前一时刻的土地利用类型的基础上变化的，因此土地利用变化过程符合MC过程^[32]。具体公式如下式所示：

$$S_{(t+1)} = P_{i,j} \times S_t \quad (3)$$

式中： S_t 表示 t 时刻的土地利用状态； $S_{(t+1)}$ 表示 $t+1$ 时刻的土地利用状态； $P_{i,j}$ 为状态转移概率矩阵。研究采用MC模型预测河西走廊地区未来土地利用变化的数量，并将其作为元胞模型中模拟未来土地变化的重要输入参考。

(4) 元胞自动机 (Cellular Automata, CA)：CA模型主要由元胞、元胞状态、邻域和转换规则四个要素组成，常用于自组织系统演变过程的研究^[33,34]。CA模型是一种时间、空间和状态都离散的网格动力学模型，具有模拟复杂空间结构的能力，充分体现了“复杂系统来自简单子系统相互作用”的理念。在绝大多数情况下，城市元胞只有城市用地和非城市用地这两种元胞状态，对于多种土地利用类型显然是不适用的，因此研究采用Liang等^[35]提出并改进的CA模型，该模型基于自适应机制能有效处理多种土地利用类型发生相互转化时的不确定性，极大提高了CA模型的模拟精度和能力。此外，将该模型与Markov方法结合，可综合二者的优点，既能提高土地利用类型之间转化的预测精度，又可反映其空间格局的变化（图1）。

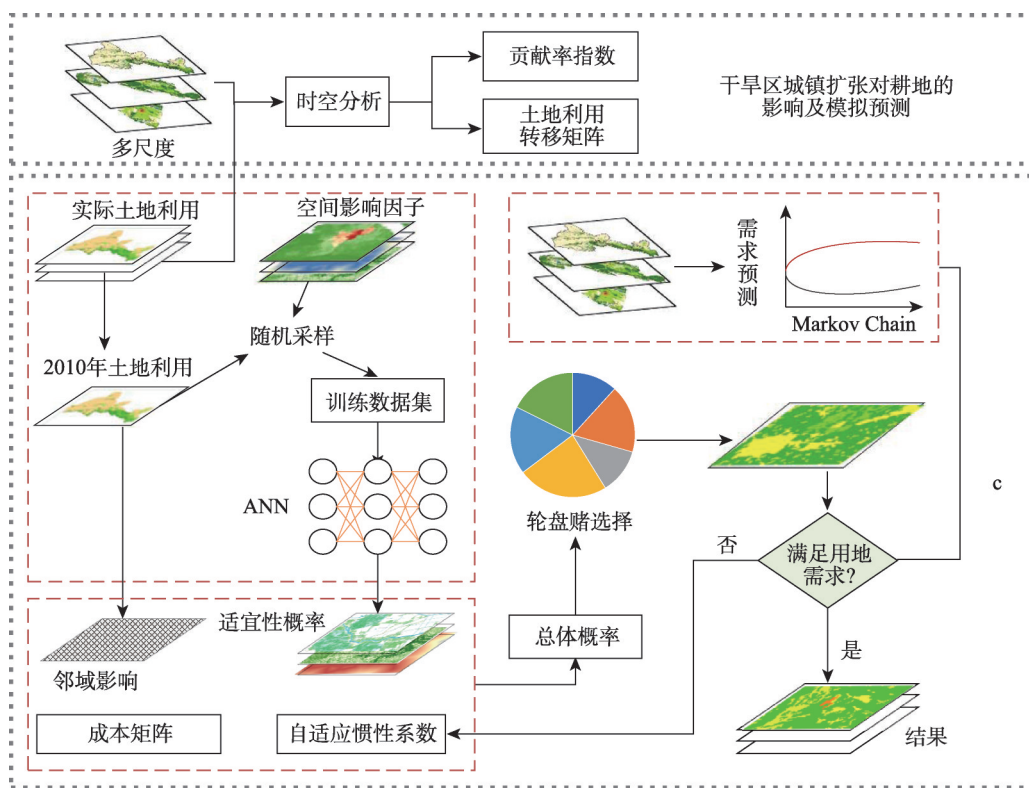


图1 技术流程图

Fig. 1 Research technology flowchart

2 结果分析

2.1 土地利用现状特征

2.1.1 土地利用结构特征

土地利用结构是各种利用类型的土地按照一定方式组成的集合，反映了土地资源的分布特点。只有合理的土地利用结构，才能保持土地资源的可持续发展，保障生态和粮食安全。本文首先对河西走廊现状的土地利用类型进行面积占比统计分析（表1），其次对主要数量结构特征进行分析。研究发现，2015年河西走廊土地利用类型以未利用土地和草地为主，未利用土地和草地分别占其总用地面积的67.44%和21.52%；其次为耕地和林地，占河西走廊总用地面积的6.35%和2.98%，而城镇建设用地面积占比最低，仅占总用地面积的0.63%。因此，在整个研究区的尺度上分析河西走廊土地利用结构各部分所占比例的基础上，将尺度放到河西五市上来分析河西走廊不同地市的土地利用结构特征。可以发现，河西五市大部分地市的土地利用结构也以未利用土地占比为主，张掖市的草地面积占其总用地面积的比例较未利用地占比高1.34%。对比河西五市耕地及建设用地占比情况发现，耕地面积占比较大的地区其建设用地往往占比也较多。如武威市和金昌市耕地面积占比远大于其他三市，面积占比分别为19.64%和17.72%，建设用地用地占比也分别达到了1.19%和2.68%。然而特殊的是嘉峪关的耕地面积个建设用地面积两类土地利用类型在结构上的比例相当。酒泉市的耕地占比较少，其建设用地面积占比也较低。总体上，受地理位置和气候区的影响，研究区土地利用结构较为单一，土地利用植被覆盖度较低，荒漠沙地等用地类型占比较高。

表 1 2015年河西走廊土地利用类型统计表

Table 1 Statistical table of land use types of Hexi Corridor in 2015 (%)						
区域名称	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用土地
酒泉市	2.05	0.43	16.51	0.93	0.26	79.82
嘉峪关市	9.15	0.73	25.90	2.86	9.74	51.62
金昌市	17.72	2.89	27.66	0.74	2.68	48.31
张掖市	11.59	10.24	38.07	2.28	1.09	36.73
武威市	19.64	7.67	26.17	0.31	1.19	45.02
河西走廊	6.35	2.98	21.52	1.06	0.63	67.44

2.1.2 土地利用空间分布特征

河西走廊土地利用空间分布特征包括空间分布格局和空间分布规律。河西走廊土地利用空间分布格局呈现荒漠土地为主，草地不均衡分布，建设用地与耕地则串珠状紧密相邻。作为水源涵养基地和林牧生产基地的酒泉市在城镇和耕地斑块上空间分布较少；以人工灌溉绿洲为主体的河西走廊中部地区属于农业生产区，其耕地在空间上分布较多，出现了像张掖市和武威市以耕草地组合的农牧业城镇，然而由于其地下丰富的矿产资源也出现了金昌、嘉峪关等工业型城市。

河西走廊地区呈现明显的垂直特性土地利用空间分布规律，研究通过分析高程差异下的土地分布来揭示其空间分布规律。首先结合高程等级划分为6级，分别以1500 m、2000 m、2900 m、3500 m和4000 m作为间断点，对应6个等级区（表2）。在不同高程

分带下分析不同土地利用类型的空间分布，建设用地和耕地均集中在前3个高程的等级区，其中耕地占比面积最大是3等级，达到10.85%，其次是在1等级区为8.59%，在3500 m以上基本没有耕地分布。而城镇建设用地在2等级区占比面积最大，达到1.00%。值得注意的是在3500 m以上的高程分区也有0.01%的城镇建设用地，但在这个高程分区里是没有耕地分布。可见，在不适宜耕地分布的高海拔的地区，仍有少量人类活动，这个规律也和河西走廊行政区在高程上的分布极为相似，1000~1500 m的海拔上有武威、金昌、张掖、酒泉等一系列盆地。草地和林地则较多分布在3、4、5等级区；水域受融雪的影响较大，在6等级区分布最多且随高程增加而呈现分布比例增加的趋势。

表2 不同高程区间内的土地利用类型分布特征

Table 2 Distribution of land use types under different elevation classifications

等级	高程/m	耕地/%	林地/%	草地/%	水域/%	建设用地/%	未利用土地/%
1	<1500	8.59	0.92	11.78	0.72	0.68	77.31
2	1500~2000	6.44	0.27	14.13	0.41	1.00	77.74
3	2000~2900	10.85	3.58	35.77	1.04	0.80	47.96
4	2900~3500	0.72	16.63	34.05	0.39	0.04	48.18
5	3500~4000	0	5.56	40.44	0.87	0.01	53.12
6	>4000	0	0.47	24.46	6.57	0	68.49

2.2 时空格局过程分析

河西走廊地区的城镇扩张将加剧各种用地频繁变化，使得整个地区的土地利用类型较为分散、无序，无疑加剧干旱区的生态环境脆弱性。掌握和揭示该地区土地利用类型的动向和变化规律，尤其是耕地和城镇用地，为科学协调城镇和耕地关系提供科学参考。研究基于1990—2015年6期河西走廊土地利用数据，探究城镇和耕地的内在转换关系，通过挖掘河西走廊及其包含的五个地级市城镇用地与耕地面积变化的时空规律，剖析其城镇用地与农业用地作用机制。

首先，1990—2015年河西走廊城镇及耕地的面积均呈现为先减少后增加的总体变化趋势（图2）。其差异在于，耕地面积变化曲线表现出“先减少—急剧增加—再平稳增加”的变化趋势，而城镇用地的面积则呈现为“先减少—增加—平稳增加—急剧增加”的波动变化过程。究其原因，20世纪90年代初在以农业为主导地位的发展模式下，河西走廊地区较为缓慢的城镇化进程，持续的人口增长和政策的变化等因素相互叠加，导致其城镇建设用地面积和耕地面积下降。20世纪90年代末随着西部大开发战略实施，河西走廊地区的工业及城镇迅速发展，酒泉市和金昌市等城市依托工矿产资源的开发迅速侵占部分耕地来满足其经济的发展及城镇的扩张的需求。21世纪初全国经济处于相对高增长水平，人口的增

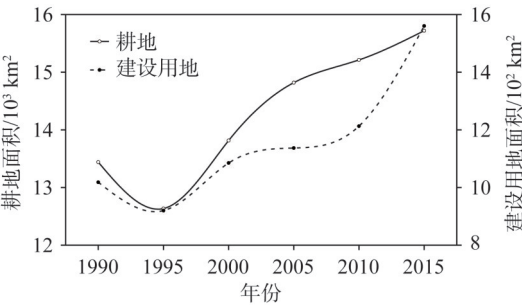


图2 1990—2015年河西走廊城镇建设用地和耕地面积变化

Fig. 2 Change of urban construction land and cultivated land area in Hexi Corridor from 1990 to 2015

加导致对粮食的需求也得到提升，但粮食的经济效益远低于与工业及房地产的利益，因此在侵占原有肥沃的耕地基础上，大力开发林草土地，贫瘠的耕地被开发来增加粮食需求。综上，在经济和人口等因素的共同作用下，河西走廊地区城镇用地与耕地相互影响。政策制定者需要结合当前的土地市场规则，在保护耕地的基础上制定相应的土地开发政策。

厘清河西走廊地区城镇与耕地的转换规律，研究采用贡献率指数来量化城镇与耕地的内在转换关系。贡献率指数结果表明（表3），（1）河西走廊耕地对城镇扩张面积的贡献率随时间呈现出减小的变化趋势。1990—2000年间，64.77%的走廊城镇扩张土地面积是耕地的贡献，2000—2010年间，耕地对城镇建设用地扩张面积的贡献降至15.41%，而在2010—2015年贡献率指数缩小至15.02%。总体来看，1990—2015年间河西走廊城镇建设用地面积持续增加，耕地的贡献率指数为15.67%，该值远低于中国其他地区耕地对城镇建设用地的贡献率，这也表明西北地区尤其是河西走廊地区对耕地红线的严格保护制度。（2）河西五市耕地对城镇扩张面积的贡献率变化趋势呈现区域不同而变化趋势不同的规律。酒泉市、张掖市和武威市的贡献率随时间呈现减小的变化趋势，金昌市和嘉峪关市的贡献率则没有明显规律。1990—2000年间，酒泉市、张掖市和武威市耕地的贡献率分别为26.39%、72.36%和98.00%；该值在2010—2015年间分布降至3.27%、19.66%和37.80%。1990—2015年间，金昌市和嘉峪关市以及酒泉市的耕地贡献率则呈现负增加趋势，可以理解为城镇建设用地转化为耕地的贡献，其贡献率分别为0.09%、2.11%和2.93%。整体来看，河西走廊地区只有张掖市和武威市耕地的贡献率指数是正向，酒泉市、嘉峪关市和金昌市耕地的贡献率是负向，究其原因可能在于酒泉和嘉峪关市等工业型城市在对人口需求饱和的基础上对粮食需求也在增长。河西走廊地区城镇与耕地的转化规律具有明显的空间异质性以及时间和尺度效应。

表3 1990—2015年河西走廊及各市耕地对城镇扩张的贡献率

Table 3 Contribution rate of cultivated land to urban expansion in Hexi Corridor and various cities from 1990 to 2015 (%)

区域名称	CR				
	1990—2000年	2000—2005年	2005—2010年	2010—2015年	1990—2015年
酒泉市	26.39	24.36	-14.75	3.27	-2.93
嘉峪关市	-0.93	0.57	-18.83	0.00	-2.11
金昌市	-3.59	3.73	18.00	4.95	-0.09
张掖市	72.36	31.40	10.15	19.66	29.09
武威市	98.00	71.78	84.33	37.80	52.87
河西走廊	64.77	22.53	-7.12	15.02	15.67

注：“-”表示城镇建设用地向耕地的转化。1990—1995年间城镇和耕地的面积均没有增加，因此计算1990—2000年的CR。

2.3 城镇扩张模拟预测

2.3.1 模拟精度评价

模型精度的评价是评估模型可用性的基础。为评价模型对于本文的可用性，以2015年的土地利用数据作为模型精度的评价参照数据，并采用均方根误差（Root Mean Squared Error, RMSE）对模型精度进行衡量。首先通过CA模型进行河西走廊地区

2015年土地利用数据的模拟,以2010年的土地利用数据作为初始状态,通过结合空间驱动因子在神经网络中训练挖掘元胞的转换规则,直至获得每种土地利用类型的适宜性概率。 $RMSE$ 对神经网络模型的训练精度进行评价,结果表明,河西走廊地区的模拟精度均值为0.22, $RMSE$ 最大值为0.25,最小为0.17,模拟训练精度较高,表明模型具有较高的可用性。

采用元胞自动机模型对2015年研究区的土地利用变化进行模拟,以Markov模型预测的土地利用变化数量作为CA模型的数量控制输入,得到2015年河西五市的土地利用变化模拟结果,然后将其与2015年河西五市真实的土地利用数据进行对比分析。结果表明(图3),CA模型模拟所得的河西五市的土地利用数据与河西五市实际的土地利用数据一致性较高,微小的区别在于模拟的土地利用数据存在斑块较大且集中的空间现象而实际土地利用数据则斑块较小且零散。原因在于元胞自动机模型是以邻域的形式向外进行概率估算,导致中心城市周围的土地转换为城市用地的概率较高而呈现斑块集中,分散的小范围建设用地或者原先不是城镇的用地转换为城镇的概率较低而转换为其他用地。 $Kappa$ 和OA对模型模拟的结果进行量化精度评价,结果表明,河西五市的OA大于84%,且 $Kappa$ 也均大于75%。表明利用元胞自动机模型模拟河西走廊地区多用地类型转换可用性程度高。

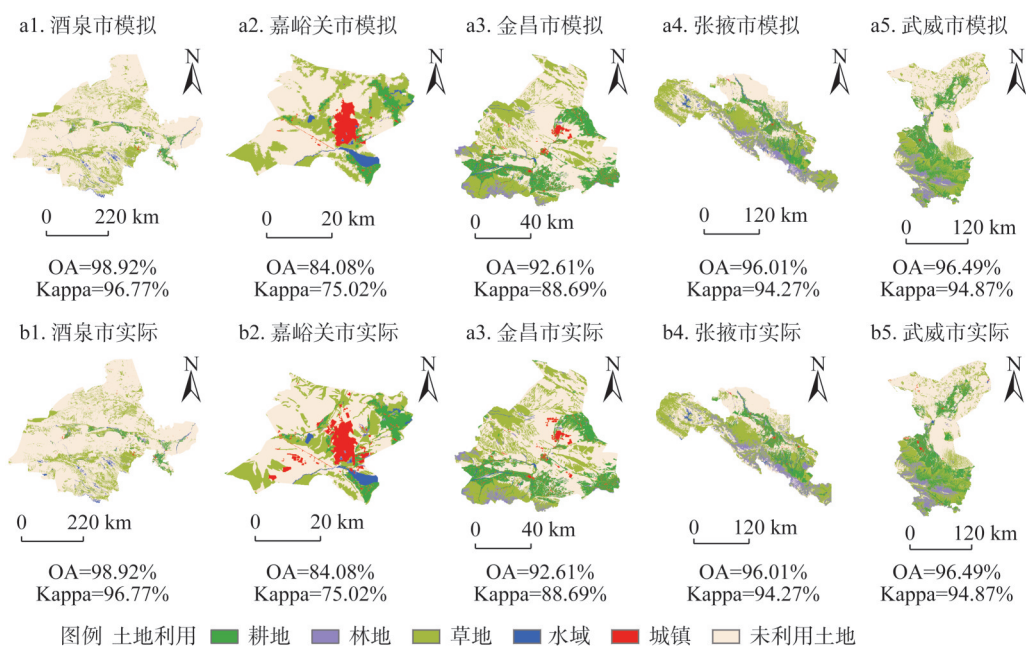


图3 2015年河西走廊土地利用变化模拟结果与实际情况对比

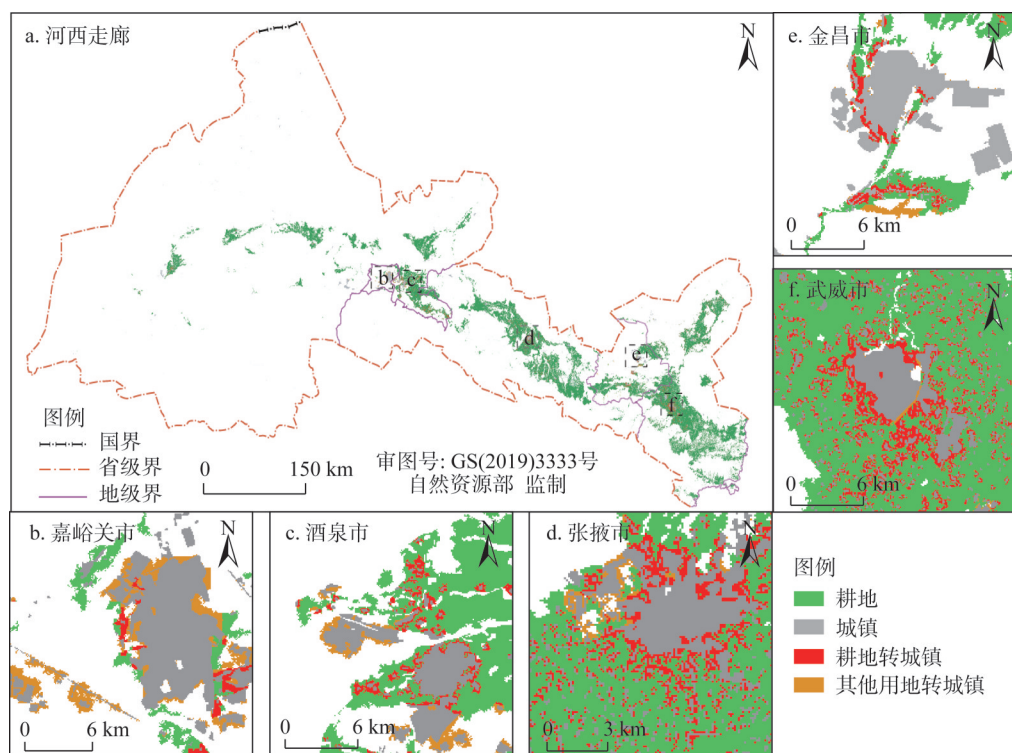
Fig. 3 Comparison of land use change simulation results and actual situation in Hexi Corridor in 2015

2.3.2 未来情景预测

研究预测2030年河西走廊用地类型的发展情景,以当前的城镇发展趋势作为基线。首先需要通过Markov模型基于2015年的土地利用数量来预测2030年河西走廊的土地利用数量,然后将其与人工神经网络挖掘出的2015年的适宜性概率矩阵进行结合,在CA

模型中共同作用得到2030年河西走廊土地利用数据。按照MC模型,河西走廊未来城镇建设用地和耕地的面积将持续增加,本文结合空间预测结果对其空间转换格局和内部转换关系进行重点剖析,以期对未来河西走廊城镇和耕地相互关系做出指导。

预测结果表明(图4),河西走廊未来城镇的扩张以辐射式扩张方式为主,即在原有城镇建设用地的基础上向外围辐射扩展。通过将预测的空间数据与2015年的土地利用数据叠加发现,未来河西走廊的城镇扩张仍以侵占耕地作为其主要用地来源。整个河西走廊地区2030年的城镇扩张面积中耕地的贡献率达到79.77%,而在地市尺度上耕地的贡献率差异更大。武威市的耕地贡献率在整个河西走廊地区是最大,达到97.98%;嘉峪关市的耕地贡献率较小,为19.02%;张掖市、金昌市和酒泉市耕地对城镇扩张的贡献率也较高,分别为94.60%、72.49%和83.84%。从城镇的增长幅度来看,嘉峪关市的城镇面积扩张幅度最大为43.37%,而张掖市的增长幅度最小为18.84%。嘉峪关市是典型的工业城市,城镇功能布局合理,未来城镇发展空间潜力巨大,因此城镇扩张速率较高。就耕地而言,农业用地空间太小,导致未来耕地占用率也较小。张掖市城镇化率相对较低且拥有丰富的耕地资源,城镇扩张幅度小侵占耕地较多也是其发展所需。酒泉市、武威市和金昌市的城镇增长幅度分别达到了27.97%、27.25%和27.85%,其耕地的贡献率也相对较低。总体来看,未来干旱区城镇的扩展仍将在原有的中心城镇的基础上向外扩展,侵占耕地是不可避免的途径,且不同地市城镇建设用地扩张对耕地侵占差异较大。考虑到干



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改。

图4 预测2030年河西走廊城镇扩张与耕地的空间关系

Fig. 4 Spatial relationship map between urban expansion and cultivated land in the Hexi Corridor in 2030

旱区脆弱的土地利用结构和生态环境,在河西走廊地区未来的城镇发展规划中,当地规划者应从全局和本地不同尺度进行合理的干预,协调经济发展和生态保护的关系,促进河西走廊土地利用结构的良性循环,保证城镇和耕地的可持续发展。

3 结论与讨论

科学了解干旱区城镇与耕地过去和未来的轨迹趋势对于干旱区新型城镇化建设具有重要意义。本文通过对河西走廊地区过去、现在及未来的预测研究,主要结论如下:(1)河西走廊地区以未利用土地和草地为主要土地利用类型,耕地和城镇面积仅占6.35%、0.63%。自然条件及生产生活方式决定了城镇用地在空间上和耕地紧邻。(2)河西走廊城镇用地与耕地的面积在多因子的相互作用下呈现波动变化趋势,通过土地利用转移矩阵探讨内部相互转换关系及贡献率上的差异,耕地空间具有显著的区域性集中的转化特点。(3)通过自适应惯性竞争机制的CA模型与ANN结合模拟河西走廊地区的土地利用变化,OA和Kappa系数评估较高的模拟精度,模型适用于河西走廊多种土地类型模拟研究。(4)2015—2030年预测结果表明,河西走廊城镇用地面积将持续增加,且扩张模式主要以外延扩展为主。城镇周围的耕地作为主要贡献来源用以支持城镇扩张,其贡献率达到79.77%。

干旱区土地利用变化的本质是当地人类活动在空间上的缩影。地理位置环境、经济以及区域土地政策是综合制约河西走廊地区城镇空间扩张规模与速度的要素。局限于数据的可获取程度,本文仅选取在一定程度能代表经济和政策的数据,如GDP和人口以及交通等因子,在空间因子的选择上还有待改进提升。此外,城镇占用周边肥沃的生产力高的农业用地时,不仅会造成地区粮产的损失,也会导致其原有的生态服务价值损失,产生一系列生境问题威胁区域可持续发展。基于“三区三线”中城镇、农业、生态三大主题要素维度与空间开发格局、国土空间用途、空间利用与资源保护三个管控层次维度对解决“城镇—耕地—生态”三者之间的冲突作用还未完全表现出来。为了实现可持续发展,联合国制定了包括能源、城市、农业、气候和生态环境等多目标的可持续发展目标,其被认为可以引导规划政策走向可持续。未来应该更多将城市实际发展情况与联合国可持续发展目标研究结合起来,平衡城市化发展与耕地保护与生态保护的关系,为干旱区城镇可持续发展政策的制定提供科学依据。

参考文献(References):

- [1] SETO K C, RAMANKUTTY N. Hidden linkages between urbanization and food systems. *Science*, 2016, 352(6288): 943-945.
- [2] 张增祥, 汪潇, 温庆可, 等. 土地资源遥感应用研究进展. *遥感学报*, 2016, 20(5): 1243-1258. [ZHANG Z X, WANG X, WEN Q K, et al. Research progress of remote sensing application in land resources. *Journal of Remote Sensing*, 2016, 20(5): 1243-1258.]
- [3] DENG X, HUANG J, ROZELLE S, et al. Impact of urbanization on cultivated land changes in China. *Land Use Policy*, 2015, 45: 1-7.
- [4] 龙花楼, 曲艺, 屠爽爽, 等. 城镇化背景下中国农区土地利用转型及其环境效应研究: 进展与展望. *地球科学进展*, 2018, 33(5): 455-463. [LONG H L, QU Y, TU S S, et al. Land use transitions under urbanization and their environmental effects in the farming areas of China: Research progress and prospect. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(5): 455-

- 463.]
- [5] 赵晓丽, 张增祥, 汪潇, 等. 中国近30 a耕地变化时空特征及其主要原因分析. 农业工程学报, 2014, 30(3): 1-11. [ZHAO X L, ZHANG Z X, WANG X, et al. Analysis of Chinese cultivated land's spatial-temporal changes and causes in recent 30 years. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 1-11.]
- [6] RAMASWAMI A, RUSSELL A G, CULLIGAN P J, et al. Meta-principles for developing smart, sustainable and healthy cities. Science, 2016, 352(6288): 940-943.
- [7] 赵雪雁, 刘江华, 王蓉, 等. 基于市域尺度的中国化肥施用与粮食产量的时空耦合关系. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1471-1482. [ZHAO X Y, LIU J H, WANG R, et al. Spatial-temporal coupling relationship between chemical fertilizer application and grain yield in China at city scale. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1471-1482.]
- [8] 王岱, 孙鸣喆, 蔺雪芹, 等. 可持续发展指向下的北京农业发展系统评价与模式分析. 中国科学院大学学报, 2014, 31(6): 745-752. [WANG D, SUN M Z, LIN X Q, et al. Analysis on characteristics and evaluation of agricultural development system in Beijing directed by sustainable development. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(6): 745-752.]
- [9] DU J, THILL J C, PEISER R B. Land pricing and its impact on land use efficiency in post-land-reform China: A case study of Beijing. Cities, 2016, 50: 68-74.
- [10] 郝庆, 邓玲, 封志明. 国土空间规划中的承载力反思: 概念、理论与实践. 自然资源学报, 2019, 34(10): 2073-2086. [HAO Q, DENG L, FENG Z M. Carrying capacity reconsidered in spatial planning: Concepts, methods and applications. Journal of Natural Resources, 2019, 34(10): 2073-2086.]
- [11] 安成邦, 王伟, 段阜涛, 等. 亚洲中部干旱区丝绸之路沿线环境演化与东西方文化交流. 地理学报, 2017, 72(5): 875-891. [AN C B, WANG W, DUAN F T, et al. Environmental changes and cultural exchange between East and West along the Silk Road in arid Centra. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(5): 875-891.]
- [12] 周亮, 朱彦儒, 孙东琪. 河西走廊城乡居名点空间分异特征及履职孕育度分析. 干旱区地理, 2020, 43(1): 227-236. [ZHOU L, ZHU Y R, SUN D Q. Spatial differentiation characteristics and oasis breed degree of urban and rural residents in Hexi Corridor. Arid Land Geography, 2020, 43(1): 227-236.]
- [13] 潘竟虎, 张建辉, 胡艳兴. 近20 a来甘肃省县域人均粮食占有量时空格局及其驱动力研究. 自然资源学报, 2016, 31(1): 124-134. [PAN J H, ZHANG J H, HU Y X. Spatial-temporal pattern of per capital grain possession and its driving forces in Gansu province. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 124-134.]
- [14] 张小雷, 杜宏茹. 中国干旱区城镇化发展现状及新型城镇化路径选择. 中国科学院院刊, 2013, (1): 46-53. [ZHANG X L, DU H R. New type of urbanization in arid zone of China: Regional characteristics and strategical choice of sustainable development path. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2013, (1): 46-53.]
- [15] 周亮, 车磊, 周成虎. 中国城市绿色发展效率时空演变特征及影响因素. 地理学报, 2019, 74(10): 2027-2044. [ZHOU L, CHE L, ZHOU C H. Spatio-temporal evolution and influencing factors of urban green development efficiency in China. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(10): 2027-2044.]
- [16] LIU Y, SONG W, DENG X. Understanding the spatiotemporal variation of urban land expansion in oasis cities by integrating remote sensing and multi-dimensional DPSIR-based indicators. Ecological Indicators, 2019, 96: 23-37.
- [17] 邓祥征. 中国西部城镇化可持续发展路径的探讨. 中国人口·资源与环境, 2013, 23(10): 24-30. [DENG X Z. Path of sustainable urbanization in Western China. China Population, Resources and Environment, 2013, 23(10): 24-30.]
- [18] 朱会义, 李义. 西北干旱区耕地扩张原因的实证分析. 地理科学进展, 2011, 30(5): 615-620. [ZHU H Y, LI Y. An empirical analysis of the causes of farmland expansion in Northwest China. Progress in Geography, 2011, 30(5): 615-620.]
- [19] HAO L, SU X, SINGH V P, et al. Suitable oasis and cultivated land scales in arid regions based on ecological health. Ecological Indicators, 2019, 102: 33-42.
- [20] 吴文婕, 石培基, 胡巍. 干旱区绿洲城市化发展与耕地保护协同性分析: 以张掖市甘州区为例. 地理科学进展, 2011, 30(5): 621-626. [WU W J, SHI P J, HU W. Research on the coordination between urbanization and cultivated land change in an oasis city of Ganzhou. Progress in Geography, 2011, 30(5): 621-626.]
- [21] TANG J, WANG L, YAO Z. Spatio-temporal urban landscape change analysis using the Markov chain model and a mod-

- ified genetic algorithm. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(15): 3255-3271.
- [22] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 基于系统动力学模型和元胞自动机模型的土地利用情景模型研究. *中国科学: D辑: 地球科学*, 2005, 35(5): 464-473. [HE C Y, SHI P J, CHEN J, et al. Land use scenario model based on system dynamics model and cellular automata model. *Science in China, Series. D*, 2005, 35(5): 464-473.]
- [23] 黎夏. 地理模拟系统: 元胞自动机与多智能体. 北京: 科学出版社, 2007. [LI X. *Geographic Simulation System: Cellular Automata and Multi-Agent*. Beijing: Science Press, 2007.]
- [24] 肖琳, 田光进, 乔治. 基于Agent的城市扩张占用耕地动态模型及模拟. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 516-527. [XIAO L, TIAN G J, QIAO Z. An Agent-based approach for urban encroachment on cropland dynamic model and simulation. *Journal of Natural Resources*, 2014, 29(3): 516-527.]
- [25] XU T, GAO J, COCO G. Simulation of urban expansion via integrating artificial neural network with Markov chain-cellular automata. *International Journal of Geographical Information Science*, 2019, 33(10): 1960-1983.
- [26] LIU X, LIANG X, LI X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [27] 刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-13. [LIU J Y, KUANG W H, ZHANG Z X, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-13.]
- [28] 徐新良, 刘纪远, 张增祥, 等. 中国5年间隔陆地生态系统空间分布数据集(1990—2010)内容与研发. *全球变化数据学报*, 2017, 1(1): 52-59. [XU X L, LIU J Y, ZHANG Z X, et al. China's 5-year interval terrestrial ecosystem spatial distribution data set (1990-2010) content and research and development. *Global Change Research Data Publishing & Repository*, 2017, 1(1): 52-59.]
- [29] 徐新良. 中国人口空间分布公里网格数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心注册与出版系统, <http://www.resdc.cn/DOI>, 2017, Doi: 10.12078/2017121101. [XU X L. China population spatial distribution kilometer grid dataset. Chinese Academy of Sciences Resource and Environmental Science Data Center Registration and Publishing System, <http://www.resdc.cn/DOI>, 2017, Doi: 10.12078/2017121101.]
- [30] 徐新良. 中国GDP空间分布公里网格数据集. 中国科学院资源环境科学数据中心注册与出版系统, <http://www.resdc.cn/DOI>, 2017, Doi: 10.12078/2017121102. [XU X L. China population spatial distribution kilometer grid dataset. Chinese Academy of Sciences Resource and Environmental Science Data Center Registration and Publishing System, <http://www.resdc.cn/DOI>, 2017, Doi: 10.12078/2017121102.]
- [31] 李俊, 董锁成, 李宇, 等. 宁蒙沿黄地带城镇用地扩展驱动力分析与情景模拟. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1472-1485. [LI J, DONG S C, LI Y, et al. Driving force analysis and scenario simulation of urban land expansion in Ningxia-Inner Mongolia area along the Yellow River. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(9): 1472-1485.]
- [32] ZHOU L, DANG X, SUN Q, et al. Multi-scenario simulation of urban land change in Shanghai by random forest and CA-Markov model. *Sustainable Cities and Society*, 2020, 55: 1-10.
- [33] 周成虎, 欧阳, 马廷, 等. 地理系统模拟的CA模型理论探讨. *地理科学进展*, 2009, 28(6): 833-838. [ZHOU C H, OU Y, MA T, et al. Theoretical perspectives of CA-based geographical system modeling. *Progress in Geography*. 2009, 28(6): 833-838.]
- [34] 杨俊, 张永恒, 葛全胜, 等. 基于GA-MCE算法的不规则邻域CA土地利用模拟. *地理研究*, 2016, 35(7): 1288-1300. [YANG J, ZHANG Y H, GE Q S, et al. Irregular neighborhood cellular automata land-use simulation based on the GA-MCE algorithm. *Geographical Research*, 2016, 35(7): 1288-1300.]
- [35] LIANG X, LIU X, LI X, et al. Delineating multi-scenario urban growth boundaries with a CA-based FLUS model and morphological method. *Landscape and Urban Planning*, 2018, 177: 47-63.

Spatial influence and prediction of oasis urban expansion on cultivated land in arid areas: A case study of the Hexi Corridor

SUN Qin-ke^{1,2}, ZHOU Liang^{1,2,3}, TANG Xiang-long⁴, SUN Dong-qi³, DANG Xue-wei^{1,2}

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, China; 3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 4. School of Architecture and Urban Planning, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Oasis city and town is a fragile ecological environment area with the most densely population, the most intense human activities and the most prominent contradiction between human and land in arid regions. Affected by global climate change and China's western development strategy, the dynamic changes between regional towns and oasis cultivated land and the trade-offs between them have become the hotspots of current concern. Based on the multi-temporal remote sensing land use data from 1990 to 2015, this paper takes the oasis cities and towns of the Hexi Corridor, a typical arid area as the research region, introduces Markov and ANN-CA models to deeply explore the land change process, quantifies the temporal and spatial dynamic transformation of urban land and cultivated land, and reveals the process and mechanism of urban expansion from cultivated land. The results show that: (1) The land types in Hexi are mainly unused land and grassland, and the urban and cultivated land accounted for 0.63% and 6.35%, respectively. The urban land and cultivated land areas showed a V-shaped change trend of first decrease and then increase. (2) From 1990 to 2015, the urban area of the expanded by 1.53 times, of which 15.67% was converted from cultivated land, and the others were mainly from unused land such as grasslands, deserts, and Gobi. The proportions of cultivated land occupied by urban expansion in five cities were quite different. (3) The simulation and prediction results combined with the Markov and ANN-CA models show that 79.77% of urban expansion land will come from cultivated land in 2015-2030, and the mode of urban spatial expansion is mainly extended. In addition, the pressure on cultivated land occupied by urban expansion will be greater in the future. The results will provide decision making support for future urban development planning and cultivated land protection.

Keywords: urban expansion; cultivated land loss; cellular automata; spatial planning; sustainable development