

干旱区河谷城市土地利用生态风险动态预测

——以新疆伊宁市为例

唐利华^{1,2}, 张永福^{1,2}, 刘小辉^{1,2}

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:土地利用规划和土地生态安全是土地资源可持续利用的基础和核心。基于伊宁市土地利用总体规划(2010—2020年),依照规划基期年及末期年土地利用结构特征,借助土地利用变化、土地利用类型动态度和生态风险空间分析方法,测算了土地利用生态风险指数。并通过运用 ArcGIS 9.3 对生态风险进行了系统采样、半变异函数分析及空间插值,研究伊宁市土地利用生态风险动态演变和空间分异特征。结果显示:伊宁市土地利用总体规划对全市土地利用空间结构进行了较大调整,土地生态风险具有明显的区域性,生态安全状况由北向南逐渐加重,且高、较高风险区在南部区域呈圆环式蔓延趋势。在未来土地利用变更中应加强生态环境保护意识,在伊宁市河谷构建良好的生态用地格局,提高土地利用的综合效益。

关键词:土地利用规划; 土地生态风险; 空间分析; 干旱区河谷; 伊宁市

中图分类号:F301

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)03-0240-06

Dynamic Forecast of Ecological Risk of Land Use in the Arid River Valley City —A Case Study of Yining City in Xinjiang Uygur Autonomous Region

TANG Lihua^{1,2}, ZHANG Yongfu^{1,2}, LIU Xiaohui^{1,2}

(1. College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Planning of land utilization and land ecological security are the foundations and cores of the sustainable use of land resources. We estimated ecological risk index based on the varieties of land use in the overall planning of land utilization of Yining City at two time points: the base year and the end year through change of land use and the method of ecological risk spatial analysis. After sampling was carried out, the semi-vario-gram analysis and block Kriging were used to analyze the dynamic evolution and spatial distribution of ecological risk of the land use in Yining City by ArcGIS 9.3. The results indicated that the spatial structure of land use had been a major adjustment in the overall planning of land utilization, the spatial distribution of land ecological risk was imbalanced in Yining City, ecological security was becoming more severe gradually from north to south, moreover, the high and the higher risk of the southern area had the tendency of ring type spreading. The change of land use in the future, ecological awareness of environmental protection should be strengthened to build an ecological land pattern in Yining valley and improve the comprehensive benefit of land use in the city.

Keywords: planning of land utilization; land ecological risk; spatial analysis; arid valley; Yining City

土地利用变化不仅影响土地资源的结构与类型,而且通过改变土地生态系统的结构和功能,影响着土地生态系统的风险与健康程度,其变化过程对区域生态安全起着决定性的作用^[1-3]。研究土地利用变化及其对生态环境产生的风险,对了解生态环境和土地资

源的合理利用以及恢复和治理有极其重要的现实意义,也能为生态安全条件下制定土地利用规划提供科学依据^[2-4]。土地利用总体规划是在一定区域内,根据土地资源特点和社会经济发展要求,从全局和长远利益出发,对各类用地结构和布局进行调整或调配的长

收稿日期:2015-5-11

修回日期:2015-06-02

资助项目:新疆伊宁市土地利用总体规划修编项目;新疆伊宁市中期实施评估项目

第一作者:唐利华(1988—),女,新疆石河子人,硕士,研究方向为土地资源规划、土地资源评价。E-mail: tanglihuahappy@126.com

通信作者:张永福(1964—),男,新疆乌鲁木齐人,副教授,硕士生导师,主要从事土地资源评价及土地利用规划、土地整治开发研究。E-mail:

zyf431@sina.com

期规划。韦仕川等^[5]运用系统采样、变异函数及空间插值方法,借助RS和GIS软件对黄河三角洲土地生态风险进行研究;叶长盛等^[6]通过系统采样,借助空间自相关和半方差分析方法,探讨了珠江三角洲生态风险空间分布及变化特征;肖琳等^[7]在景观尺度构造土地利用生态风险指数,借助空间统计学方法和弹性理论,分析天津市土地利用生态风险和变化响应的时空分异特征。区域生态风险评价具有时间动态性、空间异质性及评价过程中的复杂性等特征,大多学者开展的相关研究多数集中在描述生态风险空间特征,缺乏对土地利用动态与生态风险变化二者响应关系的深入研究。

随着城市化进程的加快,干旱区河谷城市土地资源利用不合理、土地生产力下降等土地生态安全问题日益凸显。伊宁市所属的伊犁河谷是东、南、北三面环山,东高西低、东窄西宽的三角形谷地^[8]。伊犁河谷的绿洲形态成为西北干旱区独特的生态单元,是新疆经济社会发展的净化地带和生态相对敏感的区域^[9]。由于其以资源导向型为主的土地利用模式之间的矛盾逐渐显现,使原本脆弱的生态环境更加严峻,甚至威胁到经济社会的可持续发展及西北干旱区河谷生态系统的稳定。基于以上背景,本文选取新疆伊宁市作为典型研究区。在县级土地利用规划的基础上,借助半变异函数和空间插值法,对干旱区河谷城市土地生态风险进行空间分析,预测市域土地生态问题,采取恰当措施,及时做出土地生态安全规划和防护,从而提高土地利用生态安全度、科学统筹土地利用总体规划提供技术支撑和决策依据。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况及数据来源

伊宁市地处新疆维吾尔自治区西部边境伊犁河谷中部,东连伊宁县,西接霍城县,北靠天山西部的科古琴山,南倚伊犁河,北纬 $43^{\circ}50'—44^{\circ}09'$,东经 $80^{\circ}04'—81^{\circ}29'$,是农牧混合交错地区,整体呈现北高南低、由东北向西南倾斜的地貌格局。境内总面积 $62\,279.94\text{ km}^2$ (除兵团),2009年全市总人口达45.92万人;平均海拔 $108\,310\text{ m}$,其中城区 662.5 m ,地貌单元分为中低山地、冲—洪积扇和河谷阶地;土壤类型众多,水资源丰富,素有“塞外江南”的美誉。由于受地中海、黑海暖湿气流的影响,气候适宜,形成具有中亚典型的温带大陆性半干旱特征。近年来,由于经济的高速发展和对生态环境保护的忽视,土地利用的生态环境问题日益严重。

本研究数据包括GIS数据和社会经济数据。GIS数据包括:伊宁市2009年、2020年的土地利用

类型数据、1:10万土地利用地形图、1:5万土地利用现状图,以上数据来源于《伊宁市土地利用总体规划(2010—2020)》项目研究成果,数据可靠程度较高。借鉴前人研究成果并结合本研究需要,将伊宁市土地利用类型划分为耕地、园地、林地、牧草地、城乡建设用地、交通过地、水域和未利用地8种类型。社会经济数据包括:《伊宁市统计年鉴》和《伊宁市城市总体规划(2010—2030)》。

1.2 试验方法

1.2.1 采样方式 根据伊宁市土地利用类型的面积($62\,279.94\text{ km}^2$)情况,采用 $1\text{ km}\times 1\text{ km}$ 的单元网格将生态风险指数进行空间化(图1),采用等间距系统采样法,共有697个样区,可以保证空间分异特征的呈现。根据生态风险指数公式计算出每一样区内各个土地类型的综合生态风险指数,以此作为样地中心点的生态风险水平。

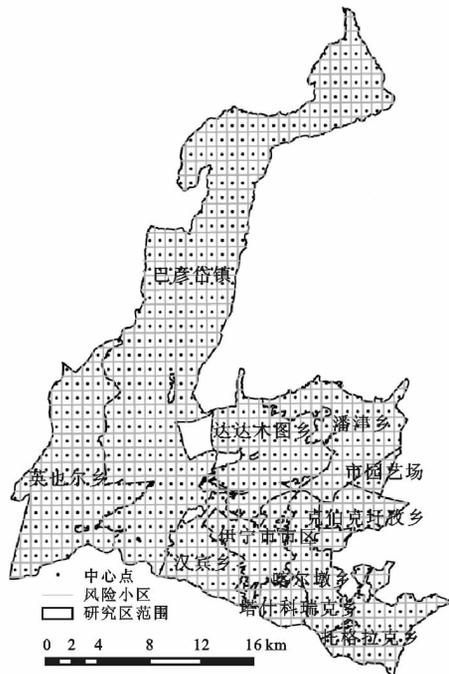


图1 生态风险样地划分

1.2.2 土地利用结构变化 信息熵可以表示城市土地利用的空间结构特征,全面反映市域内各类土地利用系统的动态演变过程和转换程度的特点。依照Shannon信息熵^[10]计算公式:

$$F_i = A_i / A \quad (1)$$

$$H = - \sum_{i=1}^n (F_i \ln F_i) \quad (2)$$

式中: A ——区域土地总面积; A_i ——某一地类面积; F_i ——各地类占土地总面积的比例; H ——土地利用结构信息熵,其大小可反映人类活动与自然作用对土地利用系统的改造程度。土地利用结构熵值低,其土地利用系统的有序性较高,生态风险程度较小;土地

利用结构熵值高,其土地利用系统的有序性低,生态风险程度较高。

1.2.3 土地利用类型动态变化 土地利用动态度是分析土地利用动态变化过程的一个重要指标,反映的是某一地区某一时间某一土地利用类型面积发生变化的一种量度^[11]。单一土地利用动态度为:

$$K = \frac{U_b - U_a}{U_a} \cdot \frac{1}{T} \times 100\% \quad (3)$$

式中: U_a, U_b ——研究期开始和结束某一土地类型的数量; T ——研究时段长。

综合土地利用动态模型为:

$$LC = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta LU_{i-j}}{2 \sum_{i=1}^n LU_i} \cdot \frac{1}{T} \times 100\% \quad (4)$$

式中: LU_i ——检测开始时第 i 类土地利用类型面积; ΔLU_{i-j} ——监测时段内第 i 类土地利用类型转化为其他土地利用类型面积总和; T ——研究时间段。笔者设定 T 的时段为年,LC 的值为土地利用类型年变化率。

1.2.4 土地生态风险指数 利用各土地利用类型的面积比重,构造各土地利用类型的生态风险指数(ERI)^[12],来建立土地利用类型与综合区域生态风险之间的经验联系,描述综合土地生态风险的相对大小,并通过采样方法把土地利用空间结构转化为空间化的生态风险变量,计算公式为:

$$ERI = \sum_{i=1}^n \frac{A_i W_i}{A} \quad (5)$$

表 1 伊宁市 2009 年和 2020 年土地利用结构变化和熵值

年份	耕地	园地	牧草地	林地	城乡建设用地	交通用地	水域	未利用地	信息熵
2009 年	18940.18	1223.52	23466.05	4867.17	9190.90	1426.7	1962.45	1201.95	0.6776
2020 年	12433.38	1057.90	21121.93	3342.77	15833.13	5976.2	1943.55	571.06	0.7118
变化量	-6506.80	-165.62	-2344.12	-1524.40	6642.23	4549.5	-18.90	-630.89	0.0342

2.2 土地利用类型动态变化

根据公式(3)得出伊宁市土地利用结构变化(表 1)。如表 1 所示,伊宁市 11 年间土地利用变化速度并不快,土地利用类型年变化率仅为 0.016%。本轮规划中城乡建设用地、交通用地所占比例大大增加,其中城乡建设用地增加了 6 642.23 hm²,增幅 72.27%,交通用地增加了 4 549.5 hm²;而耕地、园地、林地、牧草地、水域及未利用地均有一定减少,其中未利用地减少了 630.89 hm²,减少的比重最大,达到 52.49%,水域面积变化最小。减少的农用地及未利用地主要转变为了建设用地。

2.3 各乡镇(场)土地利用生态风险动态演变

生态风险指数大小是相对于生态问题可能发生的综合性概率量度,可为宏观环境的生态保护决策提供依

式中: A_i ——第 i 种土地利用类型面积; A ——总面积; W_i ——第 i 种土地利用类型所反映的生态风险强度参数。

1.2.5 生态风险空间分析方法 区域生态风险指数是可以利用地统计学方法进行空间特征分析的空间变量。经过生态风险指数系统采样,利用 ArcGIS 9.3 中的 Geostatistical Analyst(地统计分析模块),得到半变异函数^[13]:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (6)$$

式中: $\gamma(h)$ ——变异函数; $Z(x_i), Z(x_i+h)$ ——系统某属性 Z 在空间位置 $x, x+h$ 处的值; $N(h)$ ——样本对数; h ——空间距离。在此基础上,采用 Ordinary Kriging 模型进行表面模拟预测,并检查模型的合理性,得出研究区域生态风险程度空间分布图,来直观描述伊宁市生态风险空间分布状况。

2 结果与分析

2.1 土地利用结构变化

依照公式(1)~(2)得到 2009 年和 2020 年土地利用结构信息熵(表 1)。伊宁市 2009—2020 年土地利用结构信息熵由 0.6776 增加至 0.7118,净增了 0.0342,表明土地利用的空间结构特征变化较大,2009 年土地利用结构信息熵较低,土地利用系统的有序性较高,生态风险程度相对较低;至 2020 年土地利用结构信息熵增大,土地利用系统的有序性较低,生态风险程度也有增加的趋势。

据^[14]。土地生态风险强度参数 W_i 的确定参考韦仕川等^[5]的研究成果,耕地、园地、牧草地、林地、城乡建设用地、交通用地、水域、未利用地的 W_i 分别取 0.1127, 0.0693, 0.7557, 0.0174, 0.2956, 0.2119, 0.0791, 0.0844。根据各乡镇(场)土地利用类型和面积,利用生态风险指数公式和 ArcGIS 9.3 空间分析统计模板,得出 2009 年和 2020 年各乡镇(场)土地利用生态风险指数(表 2)、生态风险空间分布(图 2)、生态风险不同等级面积比例(图 3)。根据各样地生态风险指数评价结果以及伊宁市土地生态风险模拟结果,将生态风险划分为 5 个等级,即 I 低生态风险区(0.0887~0.1251)、II 较低生态风险区(0.1251~0.1615)、III 中等风险区(0.1615~0.1979)、IV 较高风险区(0.1979~0.2343)、V 高风险区(0.2343~0.2707)。

表 2 伊宁市 2009 年和 2020 年各乡镇(场)生态风险指数

年份	巴彦岱镇	英也尔乡	汉宾乡	塔什科瑞克	喀尔墩	托格拉克	克伯克圩孜	潘津乡	达达木图	市园艺场	伊宁市市区	伊宁市
2009 年	0.0889	0.1101	0.1807	0.1635	0.1649	0.1156	0.1337	0.1312	0.1402	0.1224	0.2608	0.1223
2020 年	0.1118	0.1668	0.2400	0.2356	0.1989	0.1218	0.1431	0.1495	0.1700	0.1241	0.2698	0.1519
变化量	0.0229	0.0567	0.0593	0.0721	0.034	0.0062	0.0094	0.0183	0.0298	0.0017	0.009	0.0296

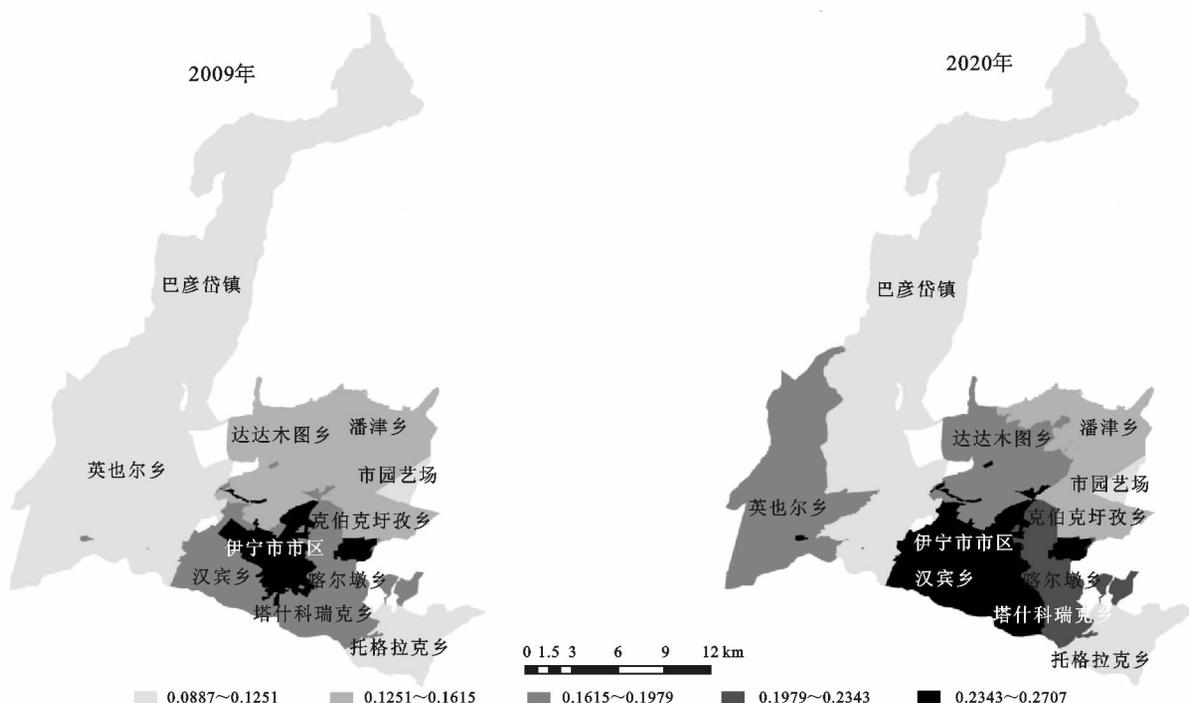


图 2 伊宁市各乡镇(场)土地利用平均生态风险空间变化分布

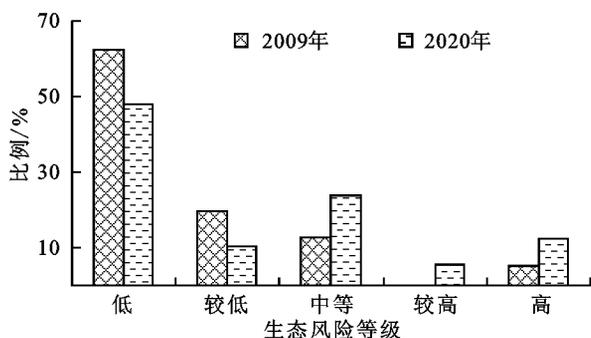


图 3 不同等级生态风险区在各年所占比例

如表 2 所示,土地利用总体规划中伊宁市的生态风险指数由 2009 年的 0.1223 增至预计 2020 年的 0.1519,风险程度增加了 24.20%,整体平均生态风险指数波动较大,生态安全程度也在逐步恶化。

由图 2—3 可知,伊宁市各乡镇(场)的土地生态风险具有明显的区域性,2009 年生态安全状况由北向南逐渐加重,而 2020 年中南部地区生态安全恶化最为明显,北端生态安全恶化并不十分严重,处于中等风险、较低风险和低风险区。伊宁市市区位于伊宁市中心城区,生态安全处于高风险区,2009 年生态风险指数为 0.2608,预计 2020 年增至 0.2698,一直处于高风险重警状态,生态安全处于较差水平,这与伊宁市城市化、工业化建设、中心城区范围不断扩张有

关;巴彦岱镇、托格拉克乡和市园艺场风险指数有所增加,但一直处于低风险状态,生态状况好于其他乡镇(场);在土地利用规划中,克伯克圩孜乡、潘津乡一直处于较低风险区,这与其多农业型乡镇,大力发展农产品密切相关;2020 年英也尔乡、达达木图乡、喀尔墩乡、汉宾乡和塔什科瑞克乡生态风险指数较 2009 年相比均有明显的增长趋势,英也尔乡从低风险区转变为中等风险区,达达木图乡从较低风险区转变为中等风险区,喀尔墩乡从中等风险区转变为较高风险区,汉宾乡和塔什科瑞克乡分别从中等风险区转变为高等风险区,处于重警状态,是生态安全恶化明显的两个乡镇。

研究区内 2009 年、2020 年各级生态风险指数面积比例均存在一定的差异。2009 年低生态风险区面积占研究区面积的 62.32%,较低生态风险区面积占 19.57%,中等风险区面积占 12.84%,无较高生态风险区,高生态风险区面积占 5.27%。规划至 2020 年,上述各级别的面积均呈现变化趋势,低生态风险区面积占研究区面积的比例减至 47.77%,较低生态风险区面积比例减至 10.46%,中等风险区面积比例增至 23.65%,较高生态风险面积比例增至 5.54%,高生态风险区面积比例增至 12.58%。上述变化说明 2009—2020 年,研究区内生态环境状况趋于恶化,这个变化趋势与前述以研究

区整体进行评价时的结论是一致的。

2.4 土地利用生态风险空间分异特征分析

利用 ArcGIS 9.3 中的地统计分析模块(Histogram 模块),得出伊宁市 ERI 值接近于正态分布,具有空间相关性。采用线性克里格法对伊宁市生态风险进行空间内插,后按掩膜提取(Extract by Mask)分析,得到伊

宁市土地利用生态风险空间分异图(图 4)。结果检验中均值(0.002 052)、平均标准差(0.006 862)接近于 0,均方根(0.013 26)、平均预测标准差(0.014 06)非常接近,均很小,标准均方根预测误差(0.914 0)接近于 1,检验结果表明误差在允许范围内,保证了伊宁市生态风险指数的准确性和可靠性。

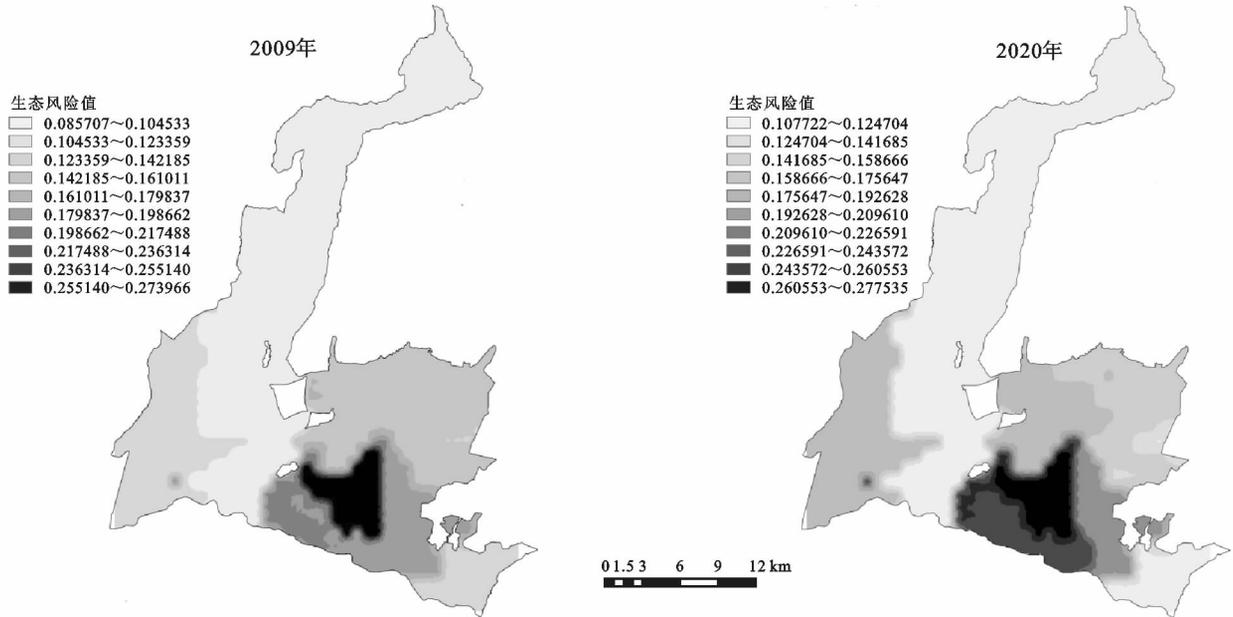


图 4 伊宁市土地利用生态风险空间分异

从 2009 年和 2020 年生态风险空间变化分异来看,在土地利用总体规划中,伊宁市土地生态风险趋于恶化趋势。南部地区的生态环境已经受到了极大破坏,生态重警区迅速扩大,较高风险区和中等风险区蔓延的速度也很快,尤其是向南部和东南部发展较为明显。原因主要是:在总体规划中,伊宁市的工业发展将步入正轨,英也尔乡、喀尔墩乡和达达木图乡结合本身的土地资源利用潜力和经济发展的方向目标,转型升级,大力发展能源、电力、科技园、建材园等高新产业,如新入驻的国网新疆电力公司、伊犁供电公司、伊犁川宁生物技术有限公司和新疆伊犁建能煤化工机械有限公司,严重忽视了生态环境建设,对生态安全造成威胁。伊宁市市区始终是伊宁市未来土地利用发展的重点,中心城区的发展方向主要是以市区为中心辐射发展,向南部(汉宾乡、塔什科瑞克乡)和西北方向拓延,而北部和东北部乡镇(巴彦岱镇、潘津乡和克伯克汗孜乡)多趋向于发展农业型,重点发展小麦生产和特色林果业。市域北部大比例面积是牧草地,但随着城镇建设发展存在的潜在影响也是值得考虑的,应在生态环境尚未恶化前加大保护力度,防患于未然。

3 结论

(1) 在伊宁市土地利用总体规划(2010—2020 年)中,对全市的土地利用空间结构和布局进行了很

大的调整。规划至 2020 年,研究区内的土地利用类型未发生变化,但各土地类型的面积及其所占的比例变化明显。2009—2020 年,水域面积几乎未发生变化,未利用地及耕地面积减少明显,城乡建设用地及交通用地面积增加明显。通过分析认为,随着研究区人口的增多、建设用地的增加及其社会经济的发展,引发了一系列生态问题,人为因素对土地利用结构变化的影响愈发显著。

(2) 土地利用结构的改变导致了研究区生态风险的差异。从总体变化分析来看,规划至 2020 年,研究区生态风险呈上升趋势,生态风险指数由 2009 年的 0.122 3 上升到 2020 年 0.151 9。规划期内,各乡镇(场)的生态风险具有明显的区域性,生态风险指数相对较低的区域面积总体上趋于减少状态,而生态风险指数相对较高的区域面积总体上趋于增加状态。随着研究区生态风险的加剧,研究区的生态环境问题受到了越来越多人的关注。

(3) 2009—2020 年,研究区生态风险空间变化分异明显,生态风险由北向南逐渐加重,高、较高生态风险区呈圆环式向周围蔓延,通过分析预测说明,研究区生态环境状况总体上呈现恶化趋势。

土地利用生态风险预测是在土地利用总体规划中土地利用变化格局上构建生态风险的评价方法与

评价模型,并借助 GIS 软件对研究区生态风险进行评价,利用地统计学中的空间分析方法量化地反映生态风险的空间分布特征,从静态的现状评价转为动态的预测,进一步建立在人类活动频繁下的土地利用与区域生态环境的有机联系,为土地利用总体规划修编提供决策依据和理论支持。区域生态风险指数能够较好地评价生态环境状况,通过对生态风险指数级别的划分,高度重视高、较高生态风险区,寻求原因,提高土地生产力;加强建设中等、较低风险区,力求结构更加合理。土地利用规划是对区域各类用地结构和布局进行的长期调配,本研究区应完善土地利用规划决策体系,建立规划实施评价、规范修改制度,切实实施土地利用年度计划管理制度与社会经济发展相结合,树立科学发展观,按分期实现的原则将主要规划目标分阶段纳入研究区国民经济与社会发展 5 年计划中,构建良好的生态用地格局,提高土地利用的综合效益。

参考文献:

- [1] 史培军,江源,王静爱,等.土地利用/覆盖变化与生态安全响应机制[M].北京:科学出版社,2004.
- [2] 史培军,潘耀忠,陈晋,等.深圳市土地利用/覆盖变化与生态环境安全分析[J].自然资源学报,1999,14(4):293-299.
- [3] 袁艺,史培军,刘颖慧,等.快速城市化过程中土地覆盖格局研究:以深圳市为例[J].生态学报,2003,23(9):1832-1840.
- [4] 刘勇,张红,伊京苑.基于土地利用变化的太原市土地利

用生态风险评价研究[J].中国土地科学,2009,23(1):52-57.

- [5] 韦仕川,吴次芳,杨杨,等.基于 RS 和 GIS 的黄河三角洲土地利用变化及生态安全研究:以东营市为例[J].水土保持学报,2008,22(1):185-189.
- [6] 叶长盛,冯艳芳.基于土地利用变化的珠江三角洲生态风险评价[J].农业工程学报,2013,29(19):224-232.
- [7] 肖琳,田光进.天津市土地利用生态风险评价[J].生态学杂志,2014,33(2):469-476.
- [8] 马鹏,李志忠,靳建辉,等.基于土地利用的新疆伊犁河谷生态系统服务价值评价[J].浙江师范大学学报:自然科学版,2010,33(3):331-335.
- [9] 蒲春玲,余慧容,李晓龙,等.新疆绿洲环境友好型土地利用模式探析:以伊宁市为例[J].安徽农业科学,2010,38(33):19046-19049.
- [10] 周杜辉,王佑汉,李同昇.基于熵值函数模型的土地利用变化响应研究:以四川省阆中市为例[J].水土保持通报,2010,30(1):134-138.
- [11] 谢余初,巩杰,赵彩霞,等.干旱区绿洲土地利用变化的生态系统服务价值响应:以甘肃省金塔县为例[J].水土保持研究,2012,19(2):165-170.
- [12] 莫宏伟,任志远.风沙过渡区土地生态价值及生态风险动态研究:以陕北神木县为例[J].中国沙漠,2010,30(2):357-362.
- [13] 韦仕川,冯科,邢云峰,等.资源型城市土地利用变化及生态安全数字模拟[J].农业工程学报,2008,24(9):64-68.
- [14] 李钊,张永福,张景路.干旱区绿洲县域土地利用规划中土地生态安全预测:以新疆阿瓦提县为例[J].水土保持研究,2014,21(6):148-151,157.

(上接第 239 页)

- [12] 杜振宇,刘方春,马丙尧,等.黄河三角洲盐碱地长期人工林生态服务价值评估[J].中国农学通报,2013,29(34):17-23.
- [13] 陈春阳,陶泽兴,王焕炯,等.三江源地区草地生态系统服务价值评估[J].地理科学进展,2012,31(7):978-984.
- [14] 李进鹏,王飞,穆兴民,等.延河流域土地利用变化对其生态服务价值的影响[J].水土保持研究,2010,17(3):110-114.
- [15] 肖生春,肖洪浪,卢琦,等.中国沙漠(地)生态系统水文调控功能及其服务价值评估[J].中国沙漠,2013,33(5):1568-1576.
- [16] 孙东琪,张京祥,朱传耿,等.中国生态环境质量变化态势及其空间分异分析[J].地理学报,2012,67(12):1599-1610.
- [17] 田义超,李晶,任志远.近 300 年来黄土高原耕地变化及时空格局分析[J].干旱区资源与环境,2012,26(2):

94-101.

- [18] 朱会义,吕昌河.近 30 年延安市耕地变化的政策背景及其作用机理[J].地理研究,2010,29(8):1510-1518.
- [19] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts[J]. Ecological Economics, 2003, 46(3):351-365.
- [20] 杨梅,张广录,侯永平.区域土地利用变化驱动力研究进展与展望[J].地理与地理信息科学,2011,27(1):95-100.
- [21] 郭雅雯,赵敏娟.基于 STIRPAT 模型的陕西省耕地面积变化社会经济驱动力分析[J].水土保持研究,2012,19(6):197-201.
- [22] 张建香,张勃,尹海霞,等.2000—2011 年黄土高原植被景观格局变化[J].生态学杂志,2013,32(2):452-458.
- [23] 王超,甄霖,杜秉贞,等.黄土高原典型区退耕还林还草工程实施效果实证分析[J].中国生态农业学报,2014,22(7):850-858.