

泾河流域径流—泥沙的尺度效应研究

颜明¹, 郑明国¹, 舒畅², 孙莉英¹, 裴亮¹, 贺莉¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程

重点实验室, 北京 100101; 2. 浙江省水资源管理中心, 浙江 杭州 310012)

摘要: [目的] 分析泾河流域径流和泥沙的尺度效应, 并通过突变检测确定突变时间点, 对比突变前后水沙尺度效应的变化, 为气候变化和人类活动对水沙尺度效应研究提供支持。[方法] 收集整理泾河流域 1958—2013 年的水沙资料, 基于流域水沙异源的特性, 将流域分成南北两个分支, 分别探讨 2 条分支水沙的尺度效应, 并通过 Mann-Kendall 突变检验方法计算出突变时间点, 对比突变前后尺度效应的异同。[结果] (1) 南北两分支的径流—泥沙之间的尺度效应具有反向关系。北支(洪德—张家山)的产流模数随面积增加表现为线性增加, 南支(三关口—张家山)的产流模数随面积增加表现出对数函数关系, 随集水面积增大产流模数先快速减小后缓慢减小。北支的产沙模数随面积增加表现为线性减少, 南支的产沙模数随面积增加表现出幂函数关系, 即随面积增大产沙模数先快速增加后缓慢增加; (2) 突变后水沙都比突变前出现了不同程度的减少, 突变前后水沙的尺度效应大部分具有相同的拟合函数关系式, 仅南支的产沙模数由突变前的最优二项式函数拟合转变为突变后的线性函数。[结论] 气候变化和人类活动的共同作用不同程度的改变了泾河流域径流—泥沙的尺度效应。

关键词: 径流及泥沙; 尺度效应; Mann-Kendall 突变检验; 泾河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)06-0184-05

中图分类号: P931.1, S157.1

文献参数: 颜明, 郑明国, 舒畅, 等. 泾河流域径流—泥沙的尺度效应研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 184-188. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.031

A Study on Scale Effects of Runoff and Sediment in Jinghe River Basin

YAN Ming¹, ZHENG Mingguo¹, SHU Chang², SUN Liying¹, PEI Liang¹, HE Li¹

(1. Key Laboratory for Water Cycle and Land Surface Processes, Institute of

Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing

100101, China; 2. Department of Water Resources Management Center, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: [Objective] Analyzing the scale effects of runoff and sediment in Jinghe River basin and comparing the changes of scale effect of runoff and sediment before and after mutation, the mutation time point was determined by mutation testing in order to provide support for the study of climate change and human activities on runoff and sediment scale effects. [Methods] Collecting runoff and sediment data from 15 hydrostations within the Jinghe River basin during 1958—2013, based on the characteristics of runoff and sediment come from different sources, the Jinghe River basin was divided into northern branch and south branch to explore the scale effects of the two branches of the water and sediment. Then the Mann-Kendall shift testing method was adopted to calculate the mutation point of runoff and sediment in time, the scale effects of runoff and sediment before and after abrupt change were compared to seek similarities and differences. [Results] (1) The scale effects of runoff and sediment had a reverse relationship between northern branch and southern branch. Runoff of the north branch(Hongde-Zhangjiashan) was increased linearly with area. Runoff of the south branch (Sanguankou-Zhangjiashan) showed a logarithmic function relationship with area, runoff modulus was decreased rapidly at first and then decreased slowly. Sediment of the north branch was decreased linearly with area increasing, while sediment of south branch showed a power function relationship with

收稿日期: 2016-04-15

修回日期: 2016-05-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“黄土高原极强烈侵蚀区水沙变化的空间尺度效应及其区域差异”(41271306), “黄河流域现代季风气候驱动的水文地貌过程及其变异”(41371037)

第一作者: 颜明(1977—), 男(汉族), 四川省内江市人, 博士, 助理研究员, 主要从事河流地貌与环境研究。E-mail: yanming@igsnr.ac.cn.

area, namely specific sediment yield was increased firstly and then decreased slowly with area increasing; (2) Runoff and sediment within two branches had different degree of reduced after abrupt change. Most of scale effects kept the same fitting function as before abrupt change, only specific sediment yield of the south branch alters the optimal fitting from binomial function to linear function. [Conclusion] The scale effects of runoff and sediment of Jinghe River basin had been changed by climate change and human activities.

Keywords: runoff and sediment; scale effects; Mann-Kendall shift testing; Jinghe River basin

流域水沙的尺度效应是指径流和泥沙随集水区域面积的增加而表现出的依从关系,其形式复杂多样,可以是正比关系^[1-5],也存在反比关系^[6],甚至更为复杂的形式^[7-8],这都受沿途水沙接纳区域的自然因素和人类活动的控制^[9],因此,尺度效应研究可以用于分析流域内引起水沙变化的地理分异现象,通过径流和泥沙的尺度效应分析,能够更为系统的理解水沙的空间分布特征和上下游的汇集过程。更为具体的说,径流和泥沙(水沙)的尺度效应是指产流产沙模数随着面积的变化表现出的函数关系^[10],目前的研究主要涉及两种尺度关系,一是从微观的地貌部位坡顶到整个流域的尺度效应,研究水沙从坡面一直到流域出口的汇聚过程^[11-12];另一种是从源头到整个流域出口的尺度效应^[13-14]。目前有关侵蚀产沙的尺度效应研究较多,而径流方面的研究还较少。近几十年全球变化和人类活动对流域水沙造成剧烈影响已经成为共识,尤其是这两个主要因素对于黄河中游的水沙影响受到更多的关注^[15-16]。随着气候变化和人类活动的双重影响,黄河中游水沙出现了明显的减少趋势,相较1960—1996年,相同降雨条件下流域产流能力减弱,年降雨量 ≥ 400 mm时,人类活动对径流减少的贡献率达到80.96%,气候变化影响程度仅为19.04%,而减少的效果更为显著,这些趋势性的减少对于流域的产汇流过程的研究还有待深入。泾河流域是黄河中游渭河流域的一条重要支流,其上游支流马莲河是黄河中游多沙粗沙区南侧的一个组成部分,在气候变化和人类活动影响的背景下,分析流域水沙的尺度效应,对于流域水沙演变研究具有重要意义,也有助于流域水土保持治理措施成效的认识和指导下一步工作开展。本研究基于黄河水利委员会在泾河流域所设的15个水文站实测的1958—2013年径流和泥沙数据,分析泾河流域径流和泥沙的尺度效应,并通过突变检测确定突变时间点,对比突变前后水沙尺度效应的变化,探讨气候变化和人类活动对水沙尺度效应的影响。

1 研究区概况

泾河发源于宁夏回族自治区泾源县尾巴梁东南六盘

山东麓,全长455 km,流域面积45 421 km²。泾河流域属大陆性季风气候,雨量和气温由东南向西北逐渐递减,水系多年年平均降水量506.8 mm,年平均气温10℃左右。泾河北侧有三水河、马莲河、蒲河、茹河、洪河等支流,南侧有汭河、黑河、达溪河等支流^[17]。泾河流域地形总体特征为西北高东南低,北部为贺兰山、鄂尔多斯高原,南为秦岭山脉,西为六盘山脉,东为子午岭山系,可谓三面环山,仅出口朝向东南的冲洪积平原。地貌为黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区、土石丘陵区、黄土丘陵林区和黄土阶地区5种地貌类型,前两种类型占地面积最大,面积分别为18 775和18 053 km²,分别占流域总面积的41.4%和39.8%。泾河流域水土流失面积33 220 km²,占全流域的73.1%,为黄土高原严重水土流失区和黄河粗泥沙主要来源区。泾河多年平均径流量 1.64×10^9 m³,输沙量 2.22×10^8 t,径流量、输沙量主要集中在汛期7—10月,分别占年径流量、输沙量的62.5%,91.1%。植被整体上为温带森林草原过渡类型,但气候的地域分异导致了植被格局的空间递变,从黄土区山地、残塬沟壑区到黄土丘陵沟壑区依次出现了森林、灌丛和草地。由于开发历史早,自然植被已遭到严重破坏,退化严重。

2 数据来源及处理

黄河水利委员会在泾河流域设置了近20个水文站,我们收集了15个水文站从1958—2013年的年径流量、年输沙量数据。为了进行尺度效应分析,利用下游水文站的年径流量、年输沙量减去上游相邻控制站的年径流量和年输沙量,得到单个区间的水沙量,用单个区间的径流量和输沙量分别除以区间的面积,得到单个区间的产流模数和产沙模数。

2.1 水沙尺度效应的拟合分析

泾河具有水沙异源的典型特征,径流主要来自干流杨家坪以上及雨落坪、杨家坪至张家山区间,其径流量占径流总量的74.6%;泥沙则有50%以上来自雨落坪水文站以上的马莲河,雨落坪水文站实测的多年平均径流量为 4.65×10^8 m³,输沙量 1.34×10^8 t,分别占泾河径流量、输沙量的25.4%,51.9%。从这些数据可以发现,泥沙主要来源于北侧分支,径流主

要来源于南侧分支,因此,将泾河流域分为南北两支,北支代表水少沙多,南支代表水多沙少,北支为除去杨家坪水文站以上的区域,北支上游水文站包括:洪德、悦乐、庆阳、板桥和雨落坪 5 个水文站,南支为除去雨落坪水文站以上的区域,南支上游水文站包括三关口、泾川、袁家庵、杨闫、巴家嘴、毛家河和杨家坪 7 个水文站,南北两分支共用下游 3 个水文站:张家河、景村和张家山水文站。收集的数据主要是 15 个水文站的年径流量和年输沙量,时段为 1958—2013 年,其中张家山、雨落坪 2 个水文站的水沙序列较完整,都是 1958—2013 年,缺失 2003—2005 年的数据,杨家坪和板桥 2 个水文站的水沙资料也相对完整,只是监测时间稍晚,分别为 1964 和 1965 年,其它水文站的径流量和输沙量数据都缺失 1991—2005 年,这些水文站中大部分的监测时间开始于 1960 年前后,仅张河、袁家庵和悦乐 3 个水文站水沙的监测开始于 20 世纪 70 年代,可见,最长的数据序列达到 53 a,最短的为 23 a,大部分站点的数据时长为 30 a,数据序列的时长能够满足空间分析的要求,为部分消除大部分水文站的水沙数据存在缺失且起始年份不一致的影响,本研究取径流量和输沙量的多年平均值,分别对各分支内的径流量和输沙量从源头向把口站张家山站累加,分别除以对应的累加后的区间面积,得到每个水文站控制面积上的产流模数和产沙模数,并点绘出产流模数和产沙模数随控制面积的变化,进而对产流模数和产沙模数随面积的变化寻找最优拟合,依据自然要素对流域产流产沙的控制来解释其成因。

2.2 径流和泥沙的突变检验

采用 Mann-Kendall 突变检验方法(简称 M-K 突变检验)对泾河流域 3 个水文站(张家山、杨家坪和雨落坪)具有较长时间序列的产流模数和产沙模数进行突变检测,目的是为了将整个研究序列划分为两个时期,前期人类活动影响较小,1970 年以前为准自然条件下,之后开展了大规模的水土保持工作,这些措施并不是立刻就产生了减水减沙效应,存在一定的滞后,另一个影响是气候变化的影响,降雨量存在一定的减少趋势,对于产流产沙的影响也不可忽视,因此,需要通过统计的方法判断气候变化和人类活动导致后期水沙变化的时间节点。M-K 突变检验法是一种非参数检验方法,该方法强调不同年份数值大小的对比关系,可以反映水沙在研究期内的水沙大小对比关系的逐步累积效果,不易受少数异常值干扰,缺点是无法反映不同年份间变量差值大小对整个序列的影响,该方法已经广泛应用于气候、水文和地貌等方面的研究中。由于大多数年份水文站缺失 1991—2005

年的资料,这里仅对 3 个水文站具有较长时间的水沙序列作突变检测。

M-K 突变检验方法是对具有 n 个样本量的时间序列 x ,构造一个秩序列 S_k ,它是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数,计算方程为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$r_i = \begin{cases} +1 & (x_i > x_j) \\ 0 & (x_i \leq x_j) \end{cases} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: S_k ——秩序列; n ——样本量

在时间序列随机独立的假设下,定义统计量:

$$UF_k = \frac{[S_k - E_{(S_k)}]}{\sqrt{\text{var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: $UF_1 = 0$, $E_{(S_k)}$, $\text{var}(S_k)$ ——累计数 S_k 的均值和方差,在 x_1, x_2, \dots, x_n 相互独立时,且有相同连续分布时,通过下式计算:

$$\begin{cases} E_{(S_k)} = \frac{n(n+1)}{4} \\ \text{var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{cases} \quad (4)$$

式中: UF_k ——标准正态分布,是按时间序列 x 顺序计算出的统计量序列,按时间序列 x 逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,再重复上述过程,同时使得 $UB_k = -UF_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。由于这里计算的径流和泥沙数据是以年为单位的,在不同年份之间存在干扰的情况较小,可以认为径流和泥沙数据是相互独立的。绘制 UF_k 和 UB_k ,若两曲线相交且交点在置信区间之内,则此交点可认为是突变点,本研究中置信水平取 95%,置信区间为 ± 1.96 。

根据突变点将整个研究序列划分为突变前和突变后,分别计算突变前后各个区间径流量和输沙量的多年均值,除以各个区间的面积,得到单个区间突变前后的产流模数和产沙模数,再分别将南北两分支的突变前后的产流模数和产沙模数随面积的累加值点绘于图中,对比突变前后水沙尺度效应的变化。

3 研究结果

3.1 近 50 a 水沙的尺度效应

根据泾河流域南北两分支各水文站的产流模数,分别将两个分支从源头到出口各个控制水文站的产流模数随面积的增加点绘于图中(图 1)。从图 1 可见,北支(洪德—张家山)的产流模数随面积表现出线性增加关系。南支(三关口—张家山)的产流模数随面积的增加先快速减少,当面积超过 10 000 km²后,也就是到巴家嘴水文站以下,产流的减小速度变慢。

分别对两个分支产流模数随面积的变化进行拟合,北支的最优拟合为线性关系式,而南支的最优拟合为对数关系式。它们的表现差异主要是由于降雨和地形的差异造成的,南部上游区域为山地,降雨更多,坡度也更陡,下游为黄土丘陵沟壑区,比上游更为平缓和低矮,因而上游单位面积上汇水多于下游,最终使得产流模数从上游向下游减少。与南支相比,北支的地貌整体表现为丘陵沟壑区,而北支的上游更偏北、偏西,整个流域的降雨量从东北向西南逐渐减少,从而使得产流模数从上游向下游逐渐增加,中间不存在明显的起伏。

将南北两支的产沙模数随面积的变化点绘于图中可以发现(图 1),产沙模数与产流模数存在反向关系,南支的产沙模数随面积先快速增加,当面积超过

10 000 km²后减少速度变小,而北支的产沙模数随面积的变化表现为线性减少关系。南支的拟合关系式为幂函数关系式,而北支的拟合仍为线性关系式。从形成原因来看,虽然南支上游区域坡度较大,地势较高,存在较大的势能,物质极容易被侵蚀,但也正是这个原因,地表的松散物质已经被侵蚀,使得上游成为了裸石山区,产沙模数较小,而下游的黄土丘陵区还赋存有大量的松散黄土物质,仍处于侵蚀高发期。而北支的上游虽然降雨量较少,但上游有大量极易被侵蚀的沙黄土,存在较多大于黄土的粗颗粒,由于粗细颗粒的搭配,更容易发生高含沙水流,造成更多的侵蚀,而向下游,细颗粒开始增加,粗颗粒减少,需要更大的侵蚀能量才能产出更多的泥沙,所以,产沙模数从上游向下游是逐渐减小的。

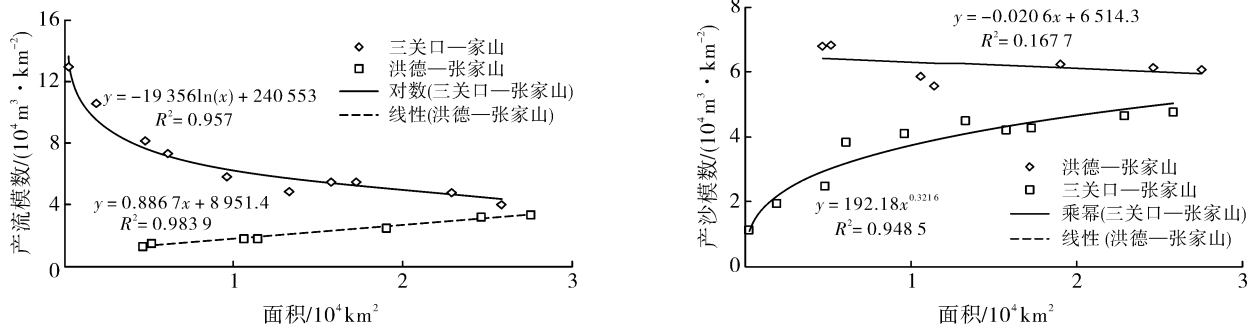


图 1 洪德—张家山和三关口—张家山两个分支产流模数和产沙模数的尺度效应

3.2 泾河流域水沙的突变分析

泾河流域的水沙在气候变化和人类活动的双重影响下发生了明显的变化,由于降雨的减少和水土保持措施的开展,径流和泥沙都呈波动减少趋势。通过 M-K 趋势检验发现,泾河流域内张家山、雨落坪和杨家坪 3 个水文站的年径流量和年输沙量都存在一个比较接近的突变年份,张家山水文站实测的径流和泥沙的突变年份都出现在 1987 年,也就是 20 世纪 80

年代后期(图 2),雨落坪和杨家坪水文站水沙突变检测与张家山水文站基本相同,仅滞后了一年(限于篇幅,图略),这与水土保持措施开展后,各项措施在拦水减沙上起的作用是分不开的。而更为明显的是 1996 年后,径流和泥沙明显减少,这是由于 90 年代后期降水明显减少引起的,从研究期内径流和泥沙序列的整体来看,选择 1987 年作为突变点是可以接受的。

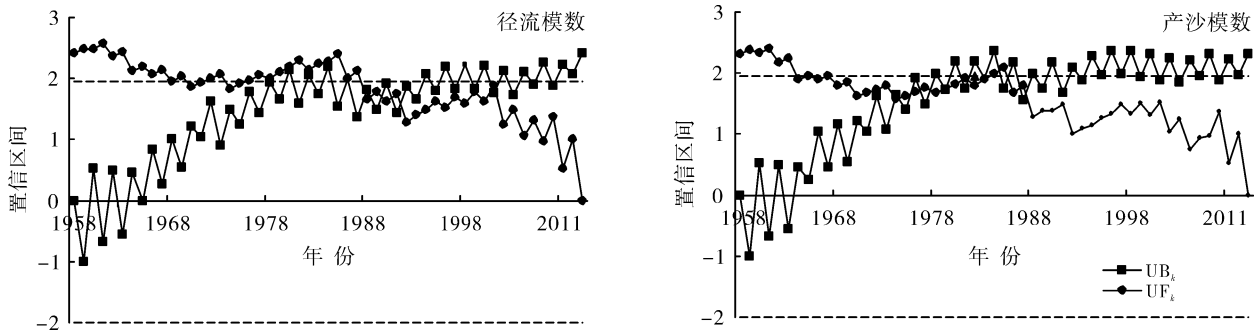


图 2 张家山水文站径流和产沙的 M-K 突变检验

3.3 水沙尺度效应突变前后的对比分析

以突变点作为时间节点,划分为突变前后两个时期,由图 3—4 可见,泾河流域的产流和产沙整体上是减少的,北支(洪德—张家山)的产流模数突变后略微减少,下游比上游减少得更明显。南支(三关口—张家山)的产流模数整体都出现了减少,突变后的尺度

效应仍表现为对数曲线。洪德—张家山的产沙模数整体都是减少的,从上游到出口保持了大致相当的减少幅度,使得后期的尺度效应仍为线性关系,拟合直线与突变前近乎平行。三关口—张家山的产沙模数表现出明显减少,尤其是中游区域,减沙效应最为明显,这使得突变后的尺度效应转变为线性关系。

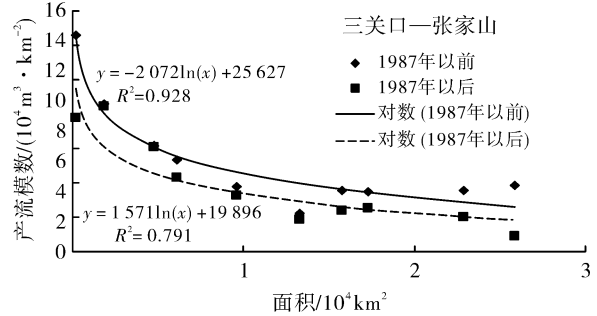
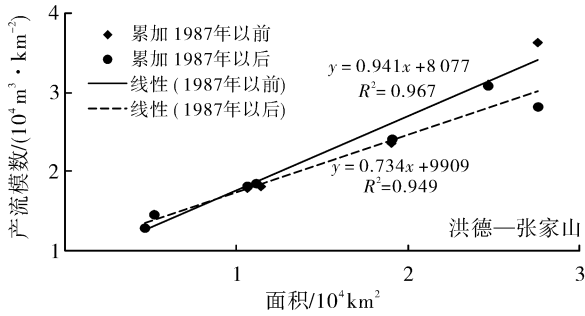


图 3 洪德—张家山和三关口—张家山突变前后产沙模数的尺度效应

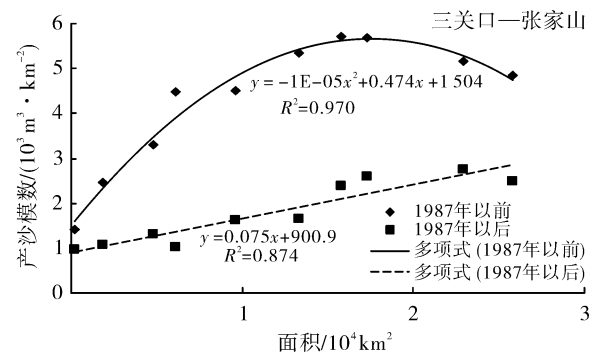
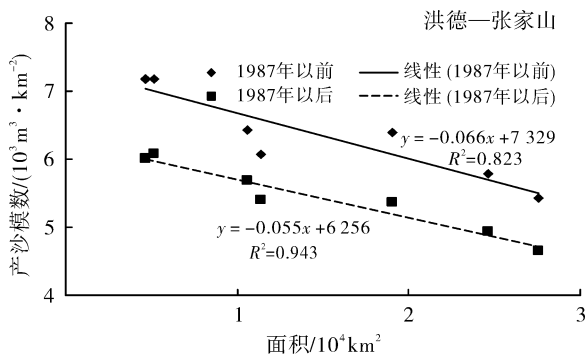


图 4 洪德—张家山和三关口—张家山突变前后产沙模数的尺度效应

4 结论

(1) 泾河流域南北两个分支(三关口—张家山和洪德—张家山)的径流与泥沙的尺度效应具有反向关系,即南支(三关口—张家山)产流模数随面积增加表现出负相关,而北支(洪德—张家山)的产流模数表现出随面积增加而增加的正相关;与径流相反,南支的泥沙随面积增加而增加,北支的泥沙随面积增加而减少。

(2) 泾河流域的水沙具有一致的趋势性和突变特性,径流和泥沙都明显减少,利用 M-K 检验 1958—2013 年径流和泥沙的突变点,发现突变时间点位于 20 世纪 80 年代后期。

(3) 水沙减少后基本没有改变泾河流域南北两支的径流和泥沙随面积变化的尺度效应,在拟合上仍可以采用突变前的函数关系式,除了三关口—张家山这一分支的产沙模数的尺度效应发生了根本性变化,由突变前的幂函数关系转变为突变后的线性函数。

[参 考 文 献]

[1] Walling D E. The sediment delivery problem[J]. Journal of Hydrology, 1983, 65(1/3):209-237.

[2] Morris G L, Fan J. Reservoir Sedimentation Handbook [M]. New York: McGraw-Hill, 1997.

[3] Owens P, Slaymaker O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins[J]. British Columbia, IASH Publications, 1992, 209:147-154.

[4] Dedkov A P, Moszherin V T. Erosion and sediment yield in mountain regions of the world[M]. Wallingford, UK: IAHS Press, 1992.

[5] Dedkov A P. The relationship between sediment yield and drainage basin area[M]//Golosov V, Belyaev V, Walling D E. Sediment Transfer Through the Fluvial System. Wallingford, UK: IAHS Press, 2004.

(下转第 194 页)

基于景观适宜性评价的建设用地管制分区研究

陈永生¹, 郭杰^{1,2}, 欧名豪^{1,2}

(1. 南京农业大学 土地管理学院, 江苏 南京 210095;

2. 南京农业大学 农村土地资源利用与整治国家地方联合工程研究中心, 江苏 南京 210095)

摘要: [目的] 开展建设用地适宜性评价并进行评价分区方案优选, 为完善建设用地适宜性评价方法、优化建设用地空间布局提供参考。[方法] 通过构建科学的建设用地适宜性评价指标体系, 合理划定适宜性等级, 根据适宜性等级的不同组合确定建设用地管制分区供选方案, 构造景观生态质量评价模型, 开展供选方案的优选。[结果] 建设用地适宜性评价结果为 6 级适宜性等级区, 面积分别为 6.03, 13.83, 27.75, 45.66, 168.24, 108.05 km²; 适宜性分区方案 1 具有较高的景观生态质量, 为方案优选结果。[结论] 基于适宜性评价的建设用地管制分区方案具有较低的干扰度、较高的稳定度, 景观生态质量综合指数较高。通过综合比较, 方案 1 具有较高景观生态质量, 它优化了城乡建设用地拓展空间, 有利于提高景观生态系统的可持续性。

关键词: 建设用地; 适宜性; 景观生态质量; 方案优选

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2016)06-0189-06

中图分类号: F301.2

文献参数: 陈永生, 郭杰, 欧名豪. 基于景观适宜性评价的建设用地管制分区研究[J]. 水土保持通报, 2016, 36(6): 189-194. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2016.06.032

Regulation Zoning of Construction Land Based on Landscape Suitability Evaluation

CHEN Yongsheng¹, GUO Jie^{1,2}, OU Minghao^{1,2}

(1. College of Land Management, Nanjing Agriculture University, Nanjing, Jiangsu

210095, China; 2. State and Local Joint Engineering Research Center of Rural Land Resources

Utilization and Consolidation, Nanjing Agriculture University, Nanjing, Jiangsu 210095, China)

Abstract: [Objective] To carry out construction land suitability evaluation and optimize the evaluation partition scheme, supplying a good reference for promoting suitability evaluation and spatial allocation of construction land. [Methods] A scientific construction land suitability evaluation index system was built to confirm the suitability of grading for potential construction land space. Construction land regulation regions were confirmed alternatively based on different combinations of suitability grades. After that, landscape ecological quality was modeled for selecting the alternative schemes. [Results] The results of construction land suitability evaluation were six-level suitability grade zones, and their area were 6.03, 13.83, 27.75, 45.66, 168.24, 108.05 km². Scheme 1 of suitability zones had higher landscape ecological quality, cond was preferred scheme. [Conclusion] Confirming construction land regulation regions based on suitability grades is an effect way to get lower disturbance degree and improve stability degree. In this case, the comprehensive landscape ecological quality index is higher. After comprehensive contrast, scheme 1 has high landscape ecological quality. Because in this scheme, urban-rural construction land allocation is more reasonable, and it will help to increase the steady of landscape ecosystem.

Keywords: construction land; suitability; landscape ecological quality; optimal scheme selection

中国工业化、城市化进程推动了经济社会快速发展^[1], 但经济发展对资源的过度依赖也导致了建设用 地规模的过度扩张。建设用地的无序扩张挤占了大量耕地和生态保护空间, 引起土地利用结构和区域生

收稿日期: 2016-01-23

修回日期: 2016-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于规划控制目标与极限供给情景的建设用地指标区域差别化配置研究: 以江苏省为例”(71303119); 教育部哲学社会科学重大攻关项目(2011JZD031)

第一作者: 陈永生(1991—), 男(汉族), 江苏省南京市人, 硕士研究生, 研究方向为土地利用规划与管理。E-mail: chen Yongsheng_njau@126.com。

通讯作者: 欧名豪(1964—), 男(汉族), 安徽省霍邱县人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土地利用规划与管理研究。E-mail: mhoul@njau.edu.cn。

态景观格局的变化,改变了生态系统的结构和功能,城市生态安全面临巨大压力^[2]。开展建设用地适宜性评价,对合理确定建设用地的规模与空间布局,对均衡经济发展与耕地保护、生态建设的关系,促进协调发展具有重要意义。国内外学者开展了大量建设用地适宜性评价的研究,运用多因子叠加^[3]、生态位模型^[4]、神经网络^[5-6]、模糊综合评判^[7]、情景分析^[8]、不确定性和灰色关联度^[9]等方法,从地形、地貌、地质、水文等自然属性^[10-12]方面构建适宜性评价指标体系开展适宜性评价;然而,建设用地的不合理扩张将影响土地生态系统结构和功能,阻碍能量流动与物质循环,使土地丧失生态保育功能,最终导致自然环境恶化、生态系统破坏以及生物多样性降低^[13-14],因此,本研究将建设用地适宜性评价融合景观可持续性需求,并进行评价结果的景观生态质量分析,以提高评价的科学性和合理性,为完善建设用地适宜性评价方法、优化建设用地布局提供参考。

1 研究区概况

扬州市位于江苏省中部,长江下游北岸、江淮平原南端,境内地势西高东低。该市拥有东郊城市森林公园、润扬湿地森林公园等众多生态安全与自然文化遗产保护区,在调节气候、涵养水源、改善大气、维护生物多样性等方面具有重要作用。然而,随着经济的快速发展,大量农业用地与生态保护空间被建设用地侵占,开展建设用地适宜性评价,并结合景观生态质量评估开展规划方案优选,对协调经济发展与耕地保

护和生态安全关系意义重大。

2 研究方法 with 数据

2.1 研究思路

建设用地适宜性评价是指导用地结构调整和优化建设用地空间布局的基础,而合理的建设用地布局,是协调经济增长与耕地保护、生态安全的重要手段^[15]。本研究从影响建设用地适宜性的自然、区位及生态因素出发,构建建设用地适宜性评价指标体系,利用熵值法确定指标权重,计算适宜性评价综合指数,采用自然断点法综合划定建设用地适宜性等级,根据适宜性等级的不同组合确定建设用地管制区的供选方案。在此基础上,基于景观生态系统稳定性和干扰度,构建景观生态质量评价模型,根据景观生态质量综合指数进行方案优选。

2.2 建设用地适宜性评价

2.2.1 指标体系的构建 合理评价建设用地适宜性,需要有科学的评价指标体系。参考相关研究^[2,15-17],依据主导性、可比性、可操作性的原则,确定自然、区位与生态 3 个一级指标。自然因子主要包括地形条件和水系水域,根据《扬州市市区地质灾害防治规划(2012—2020 年)》,研究区地质构造条件均一,没有断层、地震带的干扰,因此自然因子未考虑地基承载力、土壤渗透性、断层等地质类因素;区位因子主要包括交通区位和繁华度,评价指标包含离交通干线和城区距离等指标;生态因子包括生态保护区、人文自然保护区和基本农田保护区等生态因素(表 1)。

表 1 建设用地适宜性评价指标体系

系统层	一级指标	二级指标	三级指标	属性	权重
建设用地适宜性评价	自然因子	地形条件	高程绝对值	负	0.001 7
			坡度	负	0.000 2
		水系水域	距河流距离	正	0.167 2
			距湖泊水库距离	正	0.061 2
			距洪水调蓄区距离	正	0.102 4
			距主次干路距离	负	0.002 5
	区位因子	交通区位	距快速道路距离	负	0.006 6
			距支路距离	负	0.006 9
			距铁路距离	负	0.016 8
			距高速公路距离	负	0.011 4
		繁华度	距行政中心距离	负	0.010 9
	生态因子	生态保护区	距水源保护区距离	正	0.127 1
			距湿地保护区距离	正	0.060 0
			距生态农业区距离	正	0.078 1
		人文自然保护区	距历史人文保护区距离	正	0.070 7
距自然风景保护区距离			正	0.091 2	
基本农田保护区			距基本农田保护区距离	正	0.184 9

2.2.2 适宜性分值的计算 (1) 指标值标准化。采用极差标准化,消除指标的量纲影响,公式为:

$$X'_{ij} = \alpha(x_{ij} - \beta) / (\max x_j - \min x_j) \quad (1)$$

式中: X'_{ij} ——标准化指标值,根据指标属性(表1),当第 j 项标属性为正时, $\alpha = 1$ 且 $\beta = \min x_j$; 当第 j 项标属性为负时, $\alpha = -1$ 且 $\beta = \max x_j$; x_{ij} ——指标初始值; $\min x_j$ ——该项指标的最小值; $\max x_j$ ——该项指标的最大值。

(2) 权重确定。为消除标准化后指标值 $X'_{ij} \leq 0$ 的影响,对于 X'_{ij} 进行坐标平移,其公式为:

$$y_{ij} = X'_{ij} + \delta \quad (2)$$

式中: δ ——平移量, $\delta > \min X'_{ij}$, δ 取值越接近于 $\min X'_{ij}$, 其评价结果越精确。

平移处理后,采用熵值法确定指标权重,可以有效避免主观赋权法中主观因素对指标权重的影响。

(3) 适宜性分级阈值确定。对各评价指标进行加权求和得到适宜性综合分值。由于河流、湖泊等水域无法满足承载建设用地的要求,而自然风光、历史文化等保护区内应严控建设项目落地,该类区域内建设用地适宜性指标值和适宜性综合分值均为 0。除此类区域外,其余区域适宜性分级阈值,可利用自然断点法确定。

2.3 景观生态质量评价

2.3.1 评价指标的选取 景观生态质量指生态系统维持自身结构与功能稳定性的能力,其取决于景观生态系统稳定程度和干扰程度两方面^[18,24]。若干扰程度小于稳定程度,景观生态系统趋于稳定态,景观生态质量较高^[19,20,25-26]。景观生态系统干扰程度与人类土地活动密切相关,不合理的建设行为将造成环境恶化及生物多样性的损失。参考相关文献,选择景观形状指数(LSI)、斑块密度指数(PD)、建设用地干扰度指数(CD)表征景观生态系统受到的干扰程度。景观生态系统的稳定程度与景观空间单元的分布与组合关系密切,优化的景观格局有助于提高景观生态系统的稳定性。参考相关文献,选取景观多样性指数(SHDI)、面积加权平均斑块分维指数(AWMPFD)、景观蔓延度指数(CONTAG)表征景观生态系统的稳定程度。

2.3.2 综合指数的测算 对指标无量纲处理后,运用 Fragstats 计算指标值,并采用熵值法确定指标权重,通过加权求和分别计算景观干扰度与景观稳定度综合分值,景观生态质量综合指数采用景观稳定度指数与干扰度指数相除的形式表示。

2.4 数据获取与处理

高程、坡度数据来源于 1:50 000 扬州市 DEM 数据;河流水系、区位与繁华度、基本农田保护区数据来源于《扬州市土地利用总体规划(2006—2020年)》和

《扬州市城市总体规划(2011—2020年)》;生态保护区和自然保护区等数据源于《扬州市生态红线区域保护规划》。统一相关图层的空间投影和坐标系统,以 30 m×30 m 栅格为评价单元,运用 ArcGIS 的 Spatial Analyst 模块,获取适宜性评价指标值;运用 Fragstats 4.1 计算景观质量评价的相关指标值。

3 结果分析

3.1 适宜性评价结果分析

经计算,建设用地适宜性评价结果取值范围 0.00~0.76。水域及保护区严禁建设利用,适宜性为 0,单独划分为一级(VI级),其余区域利用自然断点法确定分区阈值,根据综合适宜指数划分为 5 级(图 1)。

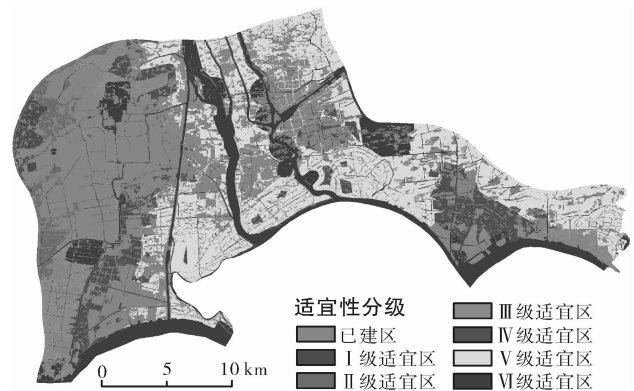


图 1 研究区建设用地适宜性分级结果

扬州市中心城区范围 640.57 km², 已建区 270.99 km², 占中心城区总面积的 42.30%。分析潜在建设用地空间的适宜性评价结果可知, I 级适宜区 6.03 km², 为无限制条件、优先作为建设用地的区域, 占中心城区总面积的 0.94%, 集中分布于中心城区西北部的西湖、新盛等乡镇(街道); II 级适宜区 13.83 km², 为基本无限制条件、适宜作为建设用的区域, 占中心城区的 2.16%, 呈片状分布于邗江区西部的西湖、蒋王、汉河等乡镇(街道); III 级适宜区 27.75 km², 为限制条件较少、可作为建设用地的区域, 占中心城区的 4.33%, 主要呈条带状和团块状分布于邗江区槐泗、平山、城北、瓜洲和江都区大桥等乡镇(街道); IV 级适宜区 45.66 km², 为限制条件较多、可作为建设用地布局的弹性空间, 占中心城区的 7.13%, 主要呈团块状分布于广陵区汤汪、邗江区槐泗、城北、施桥、八里和江都区仙女、大桥等乡镇(街道); V 级适宜区范围最广, 面积 168.24 km², 为限制条件多、一般不作为建设用地的区域, 占中心城区的 26.26%, 相互连接成片集中分布于邗江区东部乡镇、广陵区大部分乡镇和江都区的北部乡镇; VI 级适宜区

108.05 km²,为生态限制因素较多、应当禁止建设的区域,占中心城区的 16.87%,该区河流、湖泊、水库等难以满足承载建设用地的要求,在中心城区各区县均有分布;其还包括重点保护区,为区域内自然风光、历史文化、水源水质、蓄滞洪等保护区。

3.2 基于适宜性评价的管制区方案对比

参照扬州市中心城区土地利用总体规划建设用地管制区方案,根据适宜性评价分级结果,依据适宜性高低组合,形成 5 套建设用地管制区供选方案(表 2)。

表 2 基于适宜性评价的建设用地管制区方案

km²

适宜性分区	方案 1	方案 2	方案 2	方案 4	方案 5
高度适宜区	47.61(I, II, III)	19.86(I, II)	6.03(I)	19.86(I, II)	6.03(I)
中度适宜区	45.66(IV)	73.42(III, IV)	87.25(II, III, IV)	27.75(III)	13.83(II)
低度适宜区	168.24(V)	168.24(V)	168.24(V)	213.91(IV, V)	241.66(III, IV, V)
不适宜区	108.05(VI)	108.05(VI)	108.05(VI)	108.05(VI)	108.05(VI)

注:罗马数字为各方案的适宜性分区由对应的不同适宜性等级组成。

进一步研究供选方案与规划方案的差异。高度适宜区作为建设用地的限制条件少,适合作为新增建设用地的预留空间,因此可对应规划方案的允许建设区;中度适宜区有一定的限制条件,需要经过一定条件改造后,可以满足城乡建设用地需要,可作为城乡建设用地的弹性扩展空间,可对应规划方案的有条件建设区;低度适宜区建设条件较差,或者限制条件较多,一般不宜作为建设用地,可对应限制建设区;不适宜区受生态环境和历史文化保护等限制,应严格禁止建设,可对应禁止建设区。

通过对比基于适宜性评价的供选方案与规划方案发现,高度适宜区,方案 1 与规划方案新增建设用地仅相差 4.88 km²,方案 2,4 均为 19.86 km²,与规划新增建设用地相差 32.63 km²,方案 3,5 为 6.03 km²,与规划新增建设用地相差 46.46 km²;中度适宜区,方案 1 与规划方案有条件建设区相差 16.66 km²,方案 2,3 与规划方案差异较大,方案 4,5 差异较小;低度适宜区,方案 1,2,3 面积相同,与规划限制建设区相差 94.20 km²,方案 4,5 与规划方案相差较小;供选方案的不适宜区面积相同,比规划禁止建设区多 82.42 km²,主要原因是适宜性评价考虑到了更多的生态限制因素,生态安全、自然文化遗产等不宜建设区域均被划入供选方案的不适宜区。从空间分布来看(图 2),高度适宜区,方案 1 主要呈现团块状分布于中心城区西北、西南部的已建区域外围,部分零星分布于中心城区东南部,方案 2,4 主要呈团块状分布于西北部,方案 3,5 集中分布于西北部局部区域;中度适宜区,方案 1,2,3 均呈团块状分部于中心城区东南、西北、西南等区域,与已建成区组合形成

较为规整的块状区域,部分零星分部于中部,方案 4,5 主要分布于西北、西南的部分区域;低度适宜区在中心城区中、东部已建区外围呈片状分布;不适宜区在中心城区中部、南部分布较多,呈现网络状、条带状分布,主要为河流、湖泊、水库等水域,以及自然保护区、森林公园、湿地保护区、水源水质保护区、历史文化保护区等重点保护区域。

3.3 基于适宜性评价的管制区方案优选

从景观干扰度指数来看(表 3),供选方案均显著小于规划方案,其中方案 1 最优。可见,基于建设用地适宜性评价的建设用地管制区供选方案,优化了城乡建设用地拓展空间,斑块的形状相对规则,不同类型的斑块相对集中分布,破碎化程度较低,对于景观的干扰度较低,优于现有规划方案。

从景观稳定度指数来看,方案 1 较高,其余供选方案均接近或略小于规划方案。表明,基于建设用地适宜性评价的建设用地管制区供选方案,没有破坏景观生态系统的稳定性,空间异质性也没有因此而降低,方案 1 有利于提高景观生态系统的稳定性,促进建设用地空间格局向景观高度稳定性方向发展。通过景观生态质量综合指数对比分析,发现供选方案的景观生态质量综合指数值均大于现行规划方案,且方案 1 显著高于其他方案。表明,依据建设用地适宜性评价结果划定建设用地管制区具有较低的干扰度、较高的稳定度,景观生态质量综合指数较高,对优化城乡建设用地格局、保护景观系统联接度、提升生态系统服务功能具有参考价值,可以作为规划编制过程中城乡建设用地空间格局优化的依据。

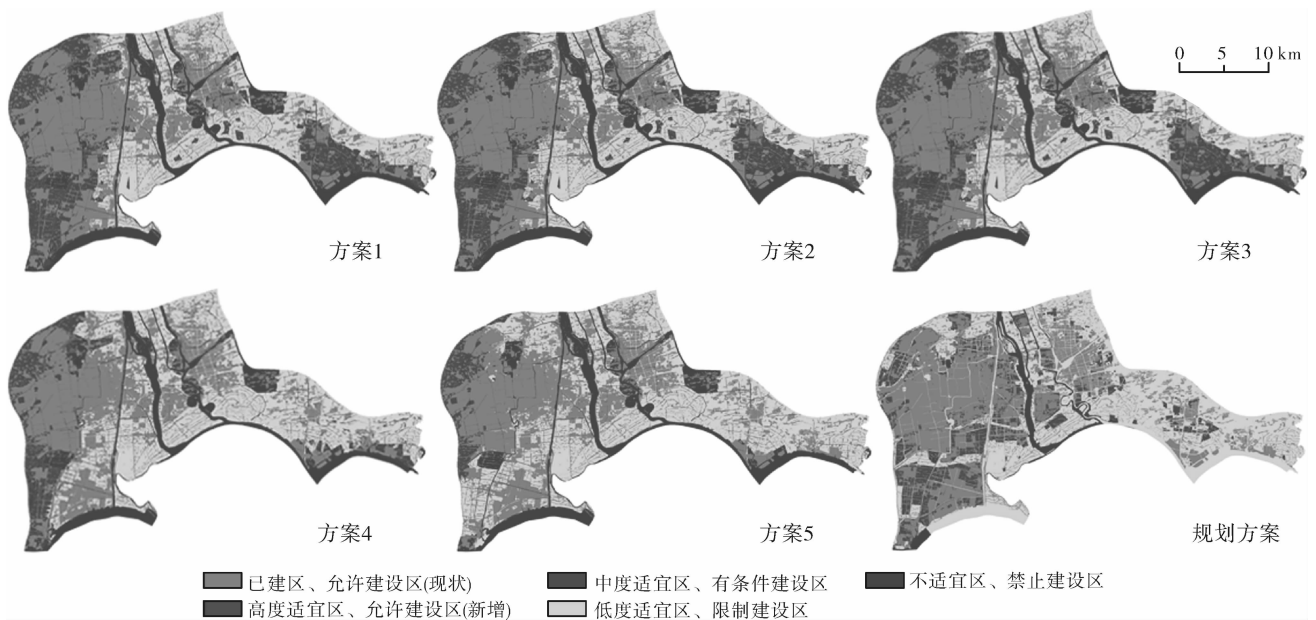


图 2 基于适宜性评价的管制区方案与规划方案对比

表 3 景观生态质量综合指数结果

对比方案	景观干扰度			景观稳定度			干扰度 指数	稳定度指数	综合指数	
	PD	LSI	CD	FRAC_AM	CONTAG	SHDI				
规划 方案	管制区	1.000 0	1.000 0	0.000 0	0.425 7	0.839 9	0.099 9	0.802 6	0.476 2	0.593 3
供选 方案	方案 1	0.000 0	0.000 0	0.104 9	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.020 7	0.592 7	28.609 8
	方案 2	0.105 2	0.069 1	1.000 0	0.831 7	0.234 6	0.411 5	0.265 2	0.436 1	1.644 5
	方案 3	0.089 1	0.061 0	0.702 3	0.841 6	0.058 5	0.508 0	0.197 2	0.401 7	2.036 9
	方案 4	0.212 2	0.120 1	0.702 3	0.366 3	0.486 5	0.275 2	0.266 5	0.382 2	1.434 6
	方案 5	0.399 0	0.218 5	1.000 0	0.000 0	1.000 0	0.000 0	0.434 3	0.407 3	0.937 8

注:PD,LSI,CD,FRAC_AM,CONTAG,SHDI 分别为斑块密度指数、景观形状指数、建设用地干扰度指数、分形维数、景观蔓延度指数、景观多样性指数。

4 讨论与结论

(1) 从自然、区位与生态 3 方面构建评价指标体系,结合熵值法评价建设用地适宜性,对合理确定建设用地的空间布局具有较好的参考价值;基于景观生态学理论,从干扰度和稳定度两方面构造景观生态质量评价模型,测算建设用地管制区供选方案的景观生态质量综合指数,为建设用地空间管制供选方案的优选提供了更为科学、可度量的方法。研究区建设用地适宜性评价结果为 I, II, III, IV, V, VI 级适宜性等级区,面积分别为 6.03, 13.83, 27.75, 45.66, 168.24, 108.05 km²;依适宜性等级高低组合各等级区,形成高度适宜、中度适宜、低度适宜和不适宜 4 类适宜性分区共 5 种分区供选方案,各方案的适宜性分区均不相同,并基于景观生态学理论进行了适宜性分区方案

与规划分区方案的对比优选,对比结果显示方案 1 具有较高的景观生态质量。

(2) 依据建设用地适宜性评价结果划定建设用地管制区,将适宜性分区与建设用地管制分区相对应,选取评价分区方案 1 作为优选结果,此方案具有较低的干扰度、较高的稳定度,景观生态质量综合指数较高,该适宜性评价分区方案有利于优化城乡建设用地格局、提高景观生态系统联接度、提升生态系统服务功能,可为规划编制中建设用地空间格局优化提供参考。

[参 考 文 献]

- [1] 宗跃光,王蓉,汪成刚,等. 城市建设用地生态适宜性评价的潜力—限制性分析:以大连城市化区为例[J]. 地理研究,2007,26(6):1117-1126.

- [2] 李猷,王仰麟,彭建,等. 基于景观生态的城市土地开发适宜性评价:以丹东市为例[J]. 生态学报, 2010, 30(8):2141-2150.
- [3] 王骏骏,江滢,赵国庆,等. 基于 GIS 的用地适宜性评价方法及应用:以新加坡怀化生态工业园概念规划为例[J]. 规划师, 2011, 27(4):52-56.
- [4] 俞艳,何建华. 基于生态位适宜度的土地生态经济适宜性评价[J]. 农业工程学报, 2008, 24(1):124-128.
- [5] 王艳,宋振柏,吴佩林. 基于 BP 网络的高新技术产业用地适宜性评价[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4):248-250.
- [6] 周秋文,方海川,苏维词. 基于 GIS 和神经网络的川西高原生态旅游适宜度评价[J]. 资源科学, 2010, 32(12):2384-2390.
- [7] 焦利民,刘耀林. 土地适宜性评价的模糊神经网络模型[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2004, 29(6):513-516.
- [8] 宗跃光,徐建刚,尹海伟. 情景分析法在工业用地置换中的应用:以福建省长汀腾飞经济开发区为例[J]. 地理学报, 2007, 62(8): 887-896.
- [9] 周建飞,曾光明,黄国和,等. 基于不确定性的城市扩展用地生态适宜性评价[J]. 生态学报, 2007, 27(2):774-783.
- [10] 尹海伟,张琳琳,孔繁花,等. 基于层次分析和移动窗口方法的济南市建设用地适宜性评价[J]. 资源科学, 2013, 35(3):530-535.
- [11] 陈燕飞,杜鹏飞,郑筱津,等. 基于 GIS 的南宁市建设用地生态适宜性评价[J]. 清华大学学报:自然科学版, 2006, 46(6):801-804.
- [12] 牛叔文,李景满,李升红,等. 基于地形复杂度的建设用地适宜性评价:以甘肃省天水市为例[J]. 资源科学, 2014, 36(10):2092-2102.
- [13] 龚建周,夏北成,陈健飞,等. 基于 3S 技术的广州市生态安全景观格局分析[J]. 生态学报, 2008, 28(9):4323-4333.
- [14] 孙翔,朱晓东,李杨帆. 港湾快速城市化地区景观生态安全评价:以厦门市为例[J]. 生态学报, 2008, 28(8):3563-3573.
- [15] 何丹,金凤君,周璟. 资源型城市建设用地适宜性评价研究:以济宁市大运河生态经济区为例[J]. 地理研究, 2011, 30(4):655-666.
- [16] 齐增湘,廖建军,徐卫华,等. 基于 GIS 的秦岭山区聚落用地适宜性评价[J]. 生态学报, 2015, 35(4):1274-1283.
- [17] 徐理,周勇,许倍慎. 基于土地生态环境质量的建设用地空间管制分区评价[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1):222-226.
- [18] 朱永恒,濮励杰,赵春雨. 景观生态质量评价研究:以吴江市为例[J]. 地理科学, 2007, 27(2):182-187.
- [19] 裴欢,魏勇,王晓妍,等. 耕地景观生态安全评价方法及其应用[J]. 农业工程学报, 2014, 30(9):212-219.
- [20] 安静,刘红玉,郝敬锋,等. 南京仙林新市区景观生态质量变化研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2):231-235.

(上接第 188 页)

- [6] Chorley R J, Schumm S A, Sugden D E. Geomorphology[M]. London: Methuen, 1984.
- [7] Church M, Slaymaker O. Disequilibrium of Holocene sediment yield in glaciated British Columbia [J]. Nature, 1989, 337(6206):452-454, 10.
- [8] Xu Jiongxin, Yan Yunxia. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations[J]. Journal of Hydrology, 2005, 307(1):219-232.
- [9] 师长兴. 长江上游输沙尺度效应研究[J]. 地理研究, 2008, 27(4):800810.
- [10] Yan Yunxia, Xu Jiongxin. A study of scale effect on specific sediment yield in the Loess Plateau, China [J]. Science in China: Earth Science, 2007, 50(1):102-112.
- [11] 李铁键,王光谦,薛海,等. 黄土沟壑区产输沙特征的空间尺度效应研究[J]. 中国科学(E):技术科学, 2009, 39(6):1095-1103.
- [12] 刘纪根,蔡强国,刘前进,等. 流域侵蚀产沙过程随尺度变化规律研究[J]. 泥沙研究, 2005(4):7-13.
- [13] 闫云霞,许炯心. 黄土高原地区侵蚀产沙的尺度效应研究初探[J]. 中国科学(D):地球科学, 2006, 36(8):767-776.
- [14] 闫云霞,王随继,颜明,等. 海河流域产沙模数尺度效应的空间分异[J]. 地理科学进展, 2014, 33(1):57-64.
- [15] 汪丽娜,王勇,高鹏,等. 黄土高原粗泥沙集中来源区水沙变化特征及趋势性分析[J]. 水土保持通报, 2008, 28(2):11-26.
- [16] 陈浩,周金星,陆中臣,等. 黄河中游流域环境要素对水沙变异的影响[J]. 地理研究, 2002, 21(2):179-187.
- [17] 刘革非,于澎涛,王彦辉,等. 黄土高原泾河流域 1960—2000 年的年输沙量时空变化[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(6):1-7.