

乡村河道生态护坡评价方法

徐得潜, 张伟

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: [目的] 探讨乡村河道生态护坡的评价方法, 为提高新农村建设中乡村河道生态综合治理水平提供支持。[方法] 从生态护坡成本、施工材料、对基本水利功能影响、生态功能和社会景观功能等 5 个方面系统地构建平原、丘陵和山区 3 种乡村河道生态护坡综合评价体系, 利用层次分析法确定这 3 种乡村河道生态护坡指标权重, 并运用秩和比法对生态护坡进行评价。[结果] 对生态石笼护坡、生态混凝土护坡、植物护坡、木桩护坡、山石护坡、生态砖挡墙和生态袋护坡等 7 种生态护坡进行选择并在 3 种不同乡村河道下进行综合评价, 确定出生态砖挡墙和植物护坡适用于十五里河中下游河段, 其加权秩和比值(WRSR)值分别为 0.692 3 和 0.662 2; 生态砖挡墙和生态混凝土护坡适用于慈湖河采石段, 其 WRSR 值分别为 0.663 5 和 0.659 0; 生态混凝土护坡和生态石笼护坡适用于九华河上游段, 其 WRSR 分别为 0.551 6 和 0.537 8。[结论] 该评价体系的评价结果较为合理, 可用于改善和提高乡村河道生态护坡的建设水平。

关键词: 乡村河道; 生态护坡; 层次分析法; 秩和比法; 综合评价

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2017)06-0197-05

中图分类号: TV861, S157.1

文献参数: 徐得潜, 张伟. 乡村河道生态护坡评价方法[J]. 水土保持通报, 2017, 37(6):197-201. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.033; Xu Deqian, Zhang Wei. Comprehensive Evaluation Methods of Rural River Ecological Revetments[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6):197-201. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2017.06.033

Comprehensive Evaluation Methods of Rural River Ecological Revetments

XU Deqian, ZHANG Wei

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China)

Abstract: [Objective] To comprehensively evaluate the ecological revetments of rural river, in order to improve the comprehensive level of ecological management of rural rivers in the construction of new countryside. [Methods] Comprehensive evaluation systems of ecological rural river revetments in plains, hills and mountain areas were built from five aspects, namely: cost, construction materials, effects on the function of water conservancy, ecological function and social landscape features. Index weights of ecological rural river revetments in the three areas above mentioned were calculated using analytic hierarchy process and the ecological revetments were evaluated using rank-sum ratio. [Results] Seven kinds of ecological revetments, including ecological stone cage revetment, ecological concrete revetment, plant revetment, timber revetment, rock revetment, ecological brick retaining wall and ecological bag revetment, were chosen to be comprehensively evaluated in three kinds of rural rivers. It was concluded that the ecological brick retaining wall and the plant revetment are suitable for the middle and lower reaches of Shiwuli River, their indexes of WRSR are 0.692 3 and 0.662 2; the ecological brick retaining wall and the ecological concrete revetment are suitable for the Caishi section of Cihu River, their indexes of WRSR are 0.663 5 and 0.659 0; and the ecological concrete revetment and the ecological stone cage revetment are suitable for the upstream of Jiuhua River, their indexes of WRSR are 0.551 6 and 0.537 8. [Conclusion] The result of this evaluation system is reasonable and can be used to improve the construction level of ecological revetments of rural river.

Keywords: rural river; ecological revetment; analytic hierarchy process; rank-sum ratio; comprehensive evaluation

收稿日期: 2017-05-18

修回日期: 2017-06-20

资助项目: 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司“生态河道助力美丽乡村建设”

第一作者: 徐得潜(1960—), 男(汉族), 安徽省青阳县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事水资源利用与水环境保护, 给水排水工程优化与经济运行, 水利水电工程优化与经济运行研究。E-mail: 13505512990@163.com。

乡村河道是指发源于乡村流域或流经乡村的自然河流,也包括人工开凿的引水、灌溉或排水的沟渠^[1]。天然乡村河道具有平面形态自然、水质良好、生态多样性丰富等特点,不仅承担着防洪、排涝、灌溉、生态、景观等功能,还是生物生长、栖息和繁衍的地方。乡村河道作为农村重要的自然资源和环境载体,关系到沿线农民生存,影响着乡村社会经济发展,是塑造乡村风貌和改善宜居环境的重要因素。生态护坡作为河流生态系统的重要组成部分,不仅可以提高河流自净能力,改善水环境,还为生物营造良好的栖息地,所以对乡村河道生态护坡综合评价的研究十分重要,将有助于建立较为统一的衡量标准,从而根据乡村发展现状和实际需求选择出较为合理的生态护坡类型来改善乡村河道岸坡坍塌和生态环境破坏的状况,提高新农村建设中乡村河道生态综合治理水平。目前对于生态护坡综合评价的研究多集中于城市河道,例如刘萌等^[2]基于层次分析法对晏黄沟的生态护坡方案进行评价与选择,但是其评价指标体系不够全面,缺少施工等相关因素;许士国等^[3]以沈阳市浑河生态护坡为研究实例,从成本、生态景观及施工工艺 3 个方面构建评价指标体系,未考虑施工过程中的生态环境成本因素;柴纯纯等^[4]运用模糊层次主成分分析法对合肥市 3 种典型生态护坡进行了评价分析,虽然指出了影响评价结果的主要指标,但是评价方法较为复杂,不方便工程实践当中使用。在对乡村河道生态护坡进行综合评价时,要借鉴这些城市河道评价的经验并补充其不足。同时乡村河道存在着景观要求较低,防洪基础设施薄弱,污染更加严重,资金短缺导致成本考虑要求较高等问题,所以乡村河道生态护坡指标体系的景观性指标可以适当降低其权重,而防洪排涝、成本和生态指标可以适当增加其权重,从而建立更加合理的乡村生态护坡综合评价指标体系。本文采用层次分析法对乡村地区平原、丘陵和山区 3 种河流生态护坡赋予指标权重,最后运用秩和比法对其进行评价。

1 评价指标体系的建立

1.1 指标构建的原则

乡村河道生态护坡综合评价是多属性评价,为使评价结果科学合理和实用,能满足其在社会、经济、生态环境等方面的需求,在构建指标体系时应遵循的原则^[5]包括:① 全面性原则。所选指标要在保证评价目标可实现的前提下,简化指标体系,并涵盖乡村河道生态护坡各方面因素。② 科学性原则。指标设置和结构要科学合理,能够客观、真实地反映乡村河道

护坡的形式及其基本特征。③ 系统性原则。指标体系必须层次结构合理,协调统一,比较全面反映乡村河道生态护坡的基本状态,为其综合评价提供必要数据。④ 因地制宜原则。根据所处地理位置的不同,乡村河道分为山区乡村河道、丘陵区乡村河道和平原区乡村河道。应结合乡村河道类型,构建指标体系。⑤ 可行性和可操作性原则。评价指标体系应具有一定的普遍性,便于实施。所选取的各指标参数要简单易得,便于分析。

1.2 评价指标的选取

乡村河道生态护坡是指在满足防洪、灌溉、排涝、航运等基本需求的前提下,综合考虑乡村河道水环境、水生态、水景观因素,将河堤由过去的浆砌块石等硬性护坡改建成适合生物和植物生长的,水、土、生物相互涵养的仿自然状态的护坡。所选取的生态护坡评价指标应与护坡的各项功能及其特点相关:① 对基本水利功能的影响,应减少防洪排涝阻水和水流冲刷的影响,防止岸坡损坏;② 生态环境功能,有利于生物与植物生长,改善水质和周边环境;③ 社会景观功能,满足人们日常休闲生活。在满足这些功能的同时,还要考虑生态护坡成本和材料的问题,一是生态环境成本,即材料生产到施工活动结束整个过程对自然环境造成的经济损失总和,包括环境资源消耗成本、环境维护和环境损失成本^[6-7],二是因地制宜选择环保性好的护坡材料,保证在生态护坡建成后不会对水体造成严重污染或对河流生态系统造成破坏。本文在保证生态护坡安全稳定的前提下,以乡村河道生态护坡的综合评价为目标层,将生态护坡成本、施工材料、对基本水利功能的影响、生态功能和社会景观功能作为准则层(5 个一级指标),建造成本等 15 个评价因素作为二级指标,构建乡村河道生态护坡综合评价指标体系^[8-11],因本文使用秩和比法进行综合评价,需要指标的排序情况,所以同时给出各个指标的比较方法如表 1 所示。按照乡村河道所处位置可将其分为乡镇段和农村段。乡镇社会经济发展水平较高,人口较为集中,对生态护坡景观有更高要求,需要考虑公众认可度和亲水性。农村段乡村河道情况则不同,可少考虑或忽略。本文研究乡镇段河道生态护坡指标体系的构建。

1.3 指标权重的确定

乡村河道生态护坡指标具有明显的层次结构,为使评价的结果更加准确可靠,根据不同指标的作用强弱,运用层次分析法^[12-13]确定各自权重。具体步骤为:① 在咨询有关专家基础上分别构造一级指标对目标层、二级指标对一级指标层两两比较相对重要性

的判断矩阵, 采用数字 1—9 及其倒数作为其标度; ② 用方根法计算各判断矩阵最大特征值 λ_{\max} ; ③ 将最大特征值对应的特征向量归一化, 求出相应元素对于准则层某一元素的相对重要性权重; ④ 计算一致性指标 CI, 求出判断矩阵的一致性比率 CR; ⑤ 若

$CR \leq 0.10$, 则说明判断矩阵一致性满足要求, 即判断结果可靠, 否则, 应对判断矩阵的标度作适当修正^[14]; ⑥ 进行层次总排序, 将二级指标相对于一级指标的权重与一级指标相对于目标层的权重相乘即得各二级指标在乡村河道生态护坡评价中所占权重。

表 1 乡村河道生态护坡指标体系与比较方法

| 一级指标 | 二级指标 | 指标比较方法 |
|------------------|-------------------|-----------------------------|
| 成本 B_1 | 建造成本 C_{11} | 单位面积建造费用高低 |
| | 年维护费 C_{12} | 每年对护坡维护、补种植物费用高低 |
| | 生态环境成本 C_{13} | 护坡材料生产到施工过程结束对自然环境造成的经济损失高低 |
| 施工材料 B_2 | 材料易得性 C_{21} | 材料获得难易程度 |
| | 施工难易程度 C_{22} | 施工过程的复杂程度 |
| | 材料环保性 C_{23} | 后期材料对生态环境影响程度 |
| 对基本水利功能的影响 B_3 | 抗冲刷性 C_{31} | 抵抗水流冲刷能力 |
| | 防洪排涝影响 C_{32} | 对防洪排涝阻水的影响程度 |
| 生态功能 B_4 | 群落结构 C_{41} | 群落配置合理程度 |
| | 物种多样性 C_{42} | 多样性指标 H 大小 |
| | 涵养地下水 C_{43} | 透水性程度 |
| | 水环境修复 C_{44} | 修复效果程度 |
| 社会景观功能 B_5 | 亲水性 C_{51} | 靠近水面程度 |
| | 与周边环境协调性 C_{52} | 与周边协调程度 |
| | 公众认可度 C_{53} | 公众对其满意度高低 |

1.4 评价方法

秩和比法是我国学者田凤调教授于 1988 年提出的^[15], 它是一种非参数统计和参数统计相结合的方法, 自提出以来就广泛应用于医学、经济和科技等多个方面的综合评价。其原理是利用统计量秩和比 (RSR) 来对评价对象排序和分档。秩和比法具体分析步骤为^[16-17]: ① 编秩。将 n 个评价对象的 m 个评价指标列成 n 行 m 列的原始数据。编出每个指标的秩, 其中高优指标从小到大编秩, 低优指标从大到小编秩, 同一指标数据相同者编平均秩。本文中评价指标都是按高优指标从小到大编秩。② 计算秩和比。当评价指标权重相同时, 秩和比法计算公式为:

$$RSR = \frac{\sum_{j=1}^m R_{ij}}{m \cdot n} \quad (1)$$

式中: R_{ij} ——第 i 行第 j 列元素的秩。当评价指标权重不同时, 按以下公式计算加权秩和比值 (WRSR)。

$$WRSR = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^m \omega_j R_{ij} \quad (2)$$

式中: ω_j ——第 j 个指标对应的权重。

本文中生态护坡指标权重不同, 所以按公式 (2) 计算。因加权秩和比值是越大越好, 所以即可由小到大排序对评价对象进行综合排序。

2 应用实例

2.1 安徽省内 3 条乡村河流基本概况

以安徽省内的合肥十五里河中下游段作为平原乡村河道的代表, 马鞍山慈湖河采石段作为丘陵乡村河道的代表, 池州市九华河上游段作为山区乡村河道的代表分别进行生态护坡的选择和综合评价。十五里河全长 27.2 km, 河道中下游地处沿巢圩区, 河床纵坡平缓, 没有急弯和险滩, 两岸地势平坦, 河面开阔, 水流较缓, 水面没有猛涨猛落的现象, 其对生态护坡防洪等级要求较低, 更加注重生态景观功能; 慈湖河发源于当涂县北部丘陵区, 全长约 18.1 km, 采石段河床断面狭窄, 河道弯曲, 有一定的淤塞, 暴雨期易发生泄洪不畅, 对生态护坡防洪排涝等级有一定要求, 同时保证生态功能, 改善水环境, 有一定的亲水功能; 九华河发源于九华山麓, 干流长 56.4 km, 河道上游岸坡土层薄、坡面陡、河道坡降大, 流速快, 挟沙能力和冲刷能力强, 其汛期降雨集中, 汇流时间短, 水位暴涨暴落, 流量变幅大, 行洪能力较差, 生态护坡选择要优先考虑洪水期水流冲刷稳定, 保证排涝安全, 兼顾一定的生态景观性。

2.2 河道生态护坡评价与选择

根据十五里河中下游段、慈湖河采石段和九华河

上游段对生态护坡的不同要求,运用层次分析法差异化赋予 3 种不同乡村河道指标权重,结果详见表 2。

表 2 3 种乡村生态护坡指标综合权重

| 十五里河中下游段 | | 慈湖河采石段 | | 九华河上游段 | |
|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 一级指标 (权重) | 二级指标 (权重) | 一级指标 (权重) | 二级指标 (权重) | 一级指标 (权重) | 二级指标 (权重) |
| B ₁ (0.206 1) | C ₁₁ (0.130 6) | B ₁ (0.186 9) | C ₁₁ (0.118 4) | B ₁ (0.158 8) | C ₁₁ (0.100 6) |
| | C ₁₂ (0.039 6) | | C ₁₂ (0.035 9) | | C ₁₁ (0.030 5) |
| | C ₁₃ (0.035 9) | | C ₁₃ (0.032 6) | | C ₁₃ (0.027 7) |
| B ₂ (0.095 0) | C ₂₁ (0.015 5) | B ₂ (0.123 3) | C ₂₁ (0.020 2) | B ₂ (0.182 4) | C ₂₁ (0.036 5) |
| | C ₂₂ (0.028 2) | | C ₂₂ (0.036 6) | | C ₂₂ (0.073 0) |
| | C ₂₃ (0.051 3) | | C ₂₃ (0.066 5) | | C ₂₃ (0.072 9) |
| B ₃ (0.206 1) | C ₃₁ (0.103 1) | B ₃ (0.283 2) | C ₃₁ (0.141 6) | B ₃ (0.344 4) | C ₃₁ (0.172 2) |
| | C ₃₂ (0.103 0) | | C ₃₂ (0.141 6) | | C ₃₂ (0.172 2) |
| B ₄ (0.367 4) | C ₄₁ (0.054 1) | B ₄ (0.283 3) | C ₄₁ (0.041 7) | B ₄ (0.209 6) | C ₄₁ (0.030 9) |
| | C ₄₂ (0.084 6) | | C ₄₂ (0.065 3) | | C ₄₂ (0.048 3) |
| | C ₄₃ (0.071 2) | | C ₄₃ (0.054 9) | | C ₄₃ (0.040 6) |
| | C ₄₄ (0.157 5) | | C ₄₄ (0.121 4) | | C ₄₄ (0.089 8) |
| B ₅ (0.125 4) | C ₅₁ (0.062 7) | B ₅ (0.123 3) | C ₅₁ (0.061 6) | B ₅ (0.104 8) | C ₅₁ (0.052 4) |
| | C ₅₂ (0.031 3) | | C ₅₂ (0.030 8) | | C ₅₂ (0.026 2) |
| | C ₅₃ (0.031 3) | | C ₅₃ (0.030 8) | | C ₅₃ (0.026 2) |

本文选择植物护坡、木桩护坡、山石护坡、生态石笼护坡、生态混凝土护坡、生态袋和生态砖挡墙等 7 种护坡作为备选生态护坡。其中植物护坡主要是通过植被根系的力学效应和水文效应来固土保土,防止水土流失,平原丘陵河道使用较多,但在山区河道冲刷较轻时,可选用香根草、狗牙根等具有一定固土和抗冲刷能力的植物对水土流失部分进行修复;山石护坡景观生态型好,叠石空隙营造动植物栖息空间,抗冲能力一般,常用于对景观要求较高的平原滨水公园的河道;木桩护坡采用原木密排打入土中,形成滨水的排档结构,生态性好,无需开挖,施工难度小,适用于不便开挖且需加固的平原丘陵河道,但木桩耐久性较差;生态砖挡墙虽由混凝土砌块构筑而成,但是保水、近水、亲水,人性化友好,具有环境空间的生态形式,在防洪安全、水景观及生态环境等方面都较为均衡,目前在江苏、上海和浙江等地的平原丘陵河道应用较多,取得的生态效果和景观效果很明显,同时在一些不便开挖的山区河道也十分适用;生态混凝土是一种新型护坡材料,具有很强的防冲刷能力,固土能力强,但是其建设及养护成本高,景观也相对单一,主要适用丘陵和山区河流,但一些平原河道的硬质化护坡进行改造时,用地紧张,也可考虑使用;生态石笼护坡具有柔性结构能适应地基的变化,具有较强的整体性、透水性、抗冲刷性,而且具有造价低、经济实惠,所

以应用面广;生态袋护坡具有工艺简便、施工工期短、就地取材、保持水土等众多的优点,应用较广,但是其景观性差,不宜使用于对景观性要求高的河道。结合不同河段边坡土质不同以及护坡特点,在十五里河中下游选择植物护坡、木桩护坡、山石护坡、生态袋护坡和生态砖挡墙进行评价选择;慈湖河采石段选择木桩护坡、生态砖挡墙、生态袋、生态混凝土和生态石笼护坡进行评价和选择;九华河上游选择生态砖挡墙、生态袋、生态混凝土和生态石笼护坡进行评价和选择,各项指标结合专家意见按从劣到优分别进行排序。首先对 5 种生态护坡在十五里河下游段进行评价,以生态环境成本为例,植物护坡施工简单,河流环境影响最小,生态环境成本最低;木桩护坡利用天然木材,生态性好,无需开挖,施工难度小,环境成本较低;生态袋护坡施工方便,其袋体由一种无纺布的土工布料做成,工期较短,对水体环境影响也较小,环境成本也相对较小;山石护坡需一定土方开挖,但使用天然石材,环境友好且可回收,环境影响相对一般,生态环境成本不高;生态砖挡墙开挖土方较大且机械施工对生态环境都有一定影响,生态环境成本最高,所以这 5 种护坡生态环境成本秩次排序依次为 5, 4, 3, 2, 1。同样方法可获得这 5 种生态护坡的其他各个指标的秩次数据,再结合层次分析法所得平原乡村河道指标权重,按照秩和比的计算公式计算加权秩和比值

(WRSR),将 WRSR 值由小到大排成一列。同样方法可求得马鞍山慈湖河采石段 5 种护坡和池州九华

河上游段 4 种生态护坡 WRSR 值及排序情况,结果详见表 3。

表 3 平原乡村 5 种护坡 WRSR 结果与排序

| 十五里河中下游段 | | | 慈湖河采石段 | | | 九华河上游段 | | |
|----------|---------|----|---------|---------|----|---------|---------|----|
| 护坡方案 | WRSR | 排序 | 护坡方案 | WRSR | 排序 | 护坡方案 | WRSR | 排序 |
| 生态砖挡墙 | 0.692 3 | 1 | 生态砖挡墙 | 0.663 5 | 1 | 生态混凝土护坡 | 0.415 3 | 1 |
| 植物护坡 | 0.662 2 | 2 | 生态混凝土护坡 | 0.659 0 | 2 | 生态石笼护坡 | 0.474 6 | 2 |
| 木桩护坡 | 0.515 5 | 3 | 生态石笼护坡 | 0.562 4 | 3 | 生态砖挡墙 | 0.537 8 | 3 |
| 山石护坡 | 0.509 5 | 4 | 木桩护坡 | 0.551 2 | 4 | 生态袋护坡 | 0.551 6 | 4 |
| 生态袋护坡 | 0.471 4 | 5 | 生态袋护坡 | 0.465 8 | 5 | | | |

2.3 河道生态护坡评价结果分析

通过秩和比法计算结果可以得出,在十五里河中下游段中,生态砖挡墙 WRSR 值最大,植物护坡次之,这主要是由于十五里河中下游段属平原乡村河道,其更注重生态性以及社会景观功能,所占权重也较大,而生态砖挡墙和植物护坡在这些方面都很优秀,所以推荐这 2 种生态护坡;慈湖河采石段生态砖挡墙 WRSR 值最大,生态混凝土护坡次之,这是由于丘陵乡村河道在兼顾生态、景观的时候,必须要更多考虑防洪排涝及抗冲刷性能,生态砖挡墙能在修复生态的同时兼顾一定的防洪排涝功能,而且结构较为稳定有一定抗冲刷性,生态混凝土护坡绿化虽较为单一,但是结构稳定,抗冲刷性能好,所以丘陵乡村河道推荐这两种护坡;在九华河上游段中,生态混凝土护坡 WRSR 值最大,生态石笼护坡次之,这主要是因为山区乡村河道是在先考虑防洪排涝、河道冲刷的基础上再去考虑生态、景观功能,生态混凝土护坡和生态石笼护坡虽生态性一般、景观单一,但都有很强的抗冲刷性,岸坡稳定性高,所以推荐山区乡村河道使用。

3 讨论与结论

(1) 本文应用层次分析法和秩和比法相结合的方式对生态石笼护坡、生态混凝土护坡、植物护坡、木桩护坡、山石护坡、生态砖挡墙和生态袋护坡进行综合评价。在合肥十五里河中下游河段中优选出生态砖护坡和植物护坡,其 WRSR 值分别为 0.692 3 和 0.662 2;马鞍山慈湖河采石段优选出生态混凝土和生态砖护坡,其 WRSR 值分别为 0.663 5 和 0.659 0;池州九华河上游段中优选出生态混凝土和生态石笼护坡,其 WRSR 分别为 0.551 6 和 0.537 8。

(2) 应用秩和比法对乡村河道生态护坡综合评价时,对指标的选择无特殊要求,计算时仅需指标的秩次,无需计算具体数值,与其他评价方法相比简化了计算还可以消除异常值的干扰。但秩和比法最终

算的值反映的是综合秩次的差距,与原始数据的顺位差程度大小无关,这样在指标转化为秩次是会损失一些原始数据的大小差别等信息,所以在具体的评价实例中,应充分调查了解评价背景和评价性质,选择适宜的方法,可使评价结果更加符合实际。

(3) 目前对于乡村河道生态护坡评价的研究并不多见,而且研究多针对某一具体的城市河流生态护坡。本文系统的将乡村河道生态护坡分为平原、丘陵和山区 3 种类型,从 5 个方面提出了 15 项评价指标,并加入了生态环境成本指标,建立了较为合理的乡村河道生态护坡指标体系,并根据其地形特点和要求,差异化赋予指标权重,并选取 3 条典型乡村河道进行生态护坡的评价和选择,其较好地考虑到不同乡村河道实际情况,评价结果较为合理,可用于改善和提高乡村河道生态护坡建设水平,对于不同类型乡村河道生态护坡的选择和评价都有一定的借鉴作用。

[参 考 文 献]

- [1] 谢三桃. 农村河道治理中的护坡材料及技术应用实例[J]. 水资源保护, 2015, 31(1): 35-40.
- [2] 刘萌. 城镇河道生态护坡材料筛选及其生态健康评价研究[D]. 山东 济南: 山东师范大学, 2013.
- [3] 许士国, 石瑞花, 黄保国, 等. 平原河道生态护坡工程评价和方案决策方法[J]. 水利学报, 2008(3): 325-331.
- [4] 柴纯纯, 徐得潜, 张浏, 等. 基于模糊层次-主成分分析法的城市河道生态护坡综合评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 167-171, 177.
- [5] 王梅婷, 徐得潜, 陈凯. 城市河道生态护坡综合评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2011, 31(1): 198-202.
- [6] 王新征. 建设项目施工期间环境成本的确定和控制方法[J]. 南阳师范学院学报, 2016(3): 29-32.
- [7] 郭庆军, 赛云秀. 生态视角下绿色施工系统研究[J]. 建筑经济, 2012(10): 93-96.
- [8] 赫晓磊. 山丘区生态河道设计方法研究[D]. 江苏 扬州: 扬州大学, 2008.

- [12] 曾永年,王慧敏.以低碳为目标的海东市土地利用结构优化方案[J].资源科学,2015,37(10):2010-2017.
- [13] 孙雯雯,梅昀,陈银蓉,等.郑州市低碳经济发展与土地集约利用之间的脱钩关系[J].水土保持通报,2015,35(4):172-175.
- [14] 王莉,陈浮,陈海燕,等.低碳经济和土地集约利用的脱钩分析体系研究:以江苏省昆山经济开发区为例[J].水土保持研究,2012,19(4):218-222.
- [15] 毋晓蕾,王婧,汪应宏,等.浙川县土地利用结构低碳优化研究[J].地域研究与开发,2013,32(2):160-165.
- [16] 王慧敏,曾永年.青海高原东部土地利用的低碳优化模拟:以海东市为例[J].地理研究,2015,34(7):1270-1284.
- [17] 王玉波,唐莹.国外土地利用规划发展与借鉴[J].人文地理,2010(3):24-28.
- [18] 陈溪,王子彦,匡文慧.土地利用对气候变化影响研究进展与图谱分析[J].地理科学进展,2011,30(7):930-937.
- [19] Chuluun T, Ojima D. Land use change and carbon cycle in arid and semi-arid lands of east and central Asia [J]. Science in China, 2002,45(S1):48-54.
- [20] 方精云,郭兆迪,朴世龙,等.1981—2000年中国陆地植被碳汇的估算[J].中国科学,2007,37(6):804-812.
- [21] 孙贤斌.安徽省会经济圈土地利用变化的碳排放效益[J].自然资源学报,2012,27(3):394-401.
- [22] 单福征,於家,赵军,等.上海郊区快速工业化的土地利用及碳排放响应:以张江高科技园区为例[J].资源科学,2011,33(8):1600-1607.
- [23] 赖力.中国土地利用的碳排放效应研究[M].江苏南京:南京大学出版社,2011:40-60.
- [24] 揣小伟,黄贤金,赖力,等.基于GIS的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J].农业工程学报,2011,27(9):1-6.
- [25] 白宏涛,王会芝,徐鹤.我国省域碳排放差异性及其转型发展模式研究[J].经济地理,2012,32(12):21-26.
- [26] 张润森,濮励杰,文继群,等.建设用地扩张与碳排放效应的库兹涅茨曲线假说及验证[J].自然资源学报,2012(5):723-733.
- [27] 石洪昕,穆兴民,张应龙,等.四川省广元市不同土地利用类型的碳排放效应研究[J].水土保持通报,2012,32(3):101-106.
- [28] 赵荣钦,黄贤金,钟大洋,等.区域土地利用结构的碳效应评估及低碳优化[J].农业工程学报,2013,25(17):220-229.
- [29] 郑欣,程久苗,郑硕.基于土地利用结构变化的芜湖市碳排放及其影响因素研究[J].水土保持研究,2012,19(3):259-262.
- [30] 肖红艳,袁兴中,李波,等.土地利用变化碳排放效应研究:以重庆市为例[J].重庆师范大学学报:自然科学版,2012,29(1):38-42,115.
- [31] 方斌,吴金凤,孟颖.江苏省土地经济密度的时空变异分析[J].农业现代化研究,2010,31(6):716-719.
- [32] 胡喜生,洪伟,吴承祯.土地生态系统服务功能价值动态估算模型的改进与应用:以福州市为例[J].资源科学,2013,35(1):30-41.
- [33] 余德贵,吴群.基于碳排放约束的土地利用结构优化模型研究及其应用[J].长江流域资源与环境,2011,20(8):911-917.

(上接第 201 页)

- [9] 王宏涛.丘陵区城市河流生态修复研究[D].河南 郑州:郑州大学,2011.
- [10] 夏继红,严忠明.生态河岸带综合评价理论与修复技术[M].北京:中国水利水电出版社,2009.
- [11] 荣冰凌,陈春娣,邓红兵.城市绿色空间综合评价指标体系构建及应用[J].城市环境与城市生态,2009,22(1):33-37.
- [12] 张臻,王龙昌,杨松,孙凡,等.基于 AHP 法的四川省水资源可持续利用综合评价[J].干旱地区农业研究,2009,27(4):213-218.
- [13] 刘荣增,耿纯.基于 AHP 的城市景观生态评价与优化:以开封市为例[J].国土与自然资源研究,2012(3):57-59.
- [14] 杜栋,庞庆华,吴炎.现代综合评价方法与案例精选[M].北京:清华大学出版社,2015.
- [15] 马云倩.基于熵权法和比法的马铃薯营养价值评价研究[J].中国农业科技导报,2016,18(6):175-180.
- [16] 毛玮.几种典型综合评价方法的比较及 SAS 软件实现[D].北京:中国人民解放军军事医学科学院,2011.
- [17] 胡斌,章仁俊.基于秩和比法的区域科技发展水平比较研究[J].工业技术经济,2004,23(6):55-57.