

北京郊区河流自然性评价 ——以汤河为例

顾岚, 高甲荣, 刘瑛, 高宇婷, 钱斌天, 王越

(北京林业大学 水土保持和荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083)

摘要: 河流的健康状况与人类社会的兴衰息息相关。通过河流自然性评价, 才能掌握河流的健康状况。以汤河为例, 在划分河段的基础上, 运用层次分析法(AHP), 利用由 22 个定量、定性指标组成的河流自然性评价体系, 从地貌、生态、水文特征 3 个方面对汤河进行了自然性评价。将评价结果分为 4 个等级: 自然型、近自然型、退化型和人工型, 其综合评价结果与聚类分析检验结果基本一致。研究数据表明, 汤河总体上处于近自然状态, 但个别区段已退化十分严重。该文建立的河流自然性评价体系可作为京郊河流评价的参考, 其评价结果可作为汤河未来生态建设的依据。

关键词: 河流生态系统; 自然性评价; 汤河; 综合评价法

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2012)01-0165-06

中图分类号: S714.7

Assessment of River Naturalness in Beijing Suburb —Taking Tanghe River as an Example

GU Lan, GAO Jia-rong, LIU Ying, GAO Yu-ting, QIAN Bin-tian, WANG Yue

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification

Combating of the Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: River health has great influences on the rise and decline of human society. The assessment of river naturalness can easily tell us whether a river is healthy or not. By taking Tanghe River as an example, the river naturalness was assessed from geographic, ecological and hydrological aspects by using analytical hierarchy process(AHP). The naturalness assessment is made based on the division of the river channel by establishing a river naturalness assessment system composed of 22 qualitative and quantitative indicators. By the final assessment result, the naturalness can be classified as four grades: natural state, near-natural state, degraded state, and artificial state, which coincide with the result from clustering analysis. Analysis of the data indicates that Tanghe River is in the near-natural state on the whole, but some portions of the watershed have been seriously degraded. The naturalness assessment system established in the study may serve as a reference for the assessment of rivers in Beijing suburb and the result from the assessment may provide a basis for future ecological construction of Tanghe River.

Keywords: river ecosystem; naturalness assessment; Tanghe River; comprehensive evaluation

水是人类社会发展的不可替代的自然资源, 同时也是生态系统不可或缺的生境要素, 河流的自然性是其发挥各种功能的基础。然而, 人类为了追求自身利益, 按照自己的意志去“改造自然”^[1]。近年来, 在北京市怀柔区旅游业、养殖业、种植业迅猛发展的同时, 河流生态系统遭受了严重的人为干扰, 污染了河流的水质, 损害了河流的“健康”。随着人类活动范围的急剧扩张, 河流趋于枯萎, 曾经洁净万物的水源遭受污染。河流功能日益衰弱, 健康状况堪忧, 迫使人们重新思考使河流回归自然。国内外许多学者提出了“河流近自然治理”的理念^[2], 而要开展河流近自然治理,

首先要对河流进行自然性评价。河流自然性评价可以作为河流管理者、开发者与社会公众进行沟通的桥梁, 促进协商机制的建立, 寻找开发与保护之间利益冲突的平衡点。本文选取汤河生态系统作为研究对象, 对受到人为活动影响的河流生态系统进行综合健康评价, 从定量、定性两方面来构建评价体系, 通过各项科学指标对汤河进行自然性评价^[3]。评价结果一方面可反映汤河流域生态系统状况, 其评价指标体系可作为京郊河流自然性评价的参考; 另一方面为京郊河流未来生态环境建设和可持续发展规划提供了依据, 以期达到“水清, 流畅, 岸绿, 景美”的治河目标。

收稿日期: 2011-03-31

修回日期: 2011-05-28

资助项目: 国际(中国与奥地利)科技合作项目“土壤生物工程在北京市怀柔区河道生态治理中的应用”(2009DFA32490)

作者简介: 顾岚(1989—), 女(汉族), 内蒙古巴彦淖尔市人, 硕士研究生, 研究方向为山地灾害防治工程。E-mail: gulanhong68@163.com。

通信作者: 高甲荣(1963—), 男(汉族), 陕西省韩城县人, 教授, 研究方向为水土保持。E-mail: jiaronggao@sohu.com。

1 评价方法

1.1 研究区概况

北京市怀柔区汤河属海河流域,潮白河水系,发源于河北省丰宁县邓家栅子,于大南沟门进入北京市怀柔县,经头道岭、喇叭沟门、七道河、长哨营到汤河口入白河。全长 110 km,境内 52.4 km,流域面积 1 253 km²,市境内 618.3 km²,沿河有 10 条余支流汇入。汤河河谷两侧为盆地,河谷土层较厚,地势开阔,水利条件较好。该流域属暖温带大陆性季风型半湿润气候,四季分明,雨热同期,夏季暖热湿润,冬季寒冷少雪。目前耕作制度多为一种一熟制,是全区籽种、杂粮、淡季蔬菜的主产区。

研究区为头道穴至汤河口河段,全长 46.5 km。在 2007 年和 2008 年的 6—8 月间进行的野外调查中,按照“每 200 m 布设 1 个调查点,如遇到生态条件突变地区,则加测一点”的原则,共布设调查点 297 个。采用分段评价的方法,与以往平均划段方法不同的是,本次评价根据流域的地貌、生态、水文特征,将相邻的、特征相似的调查点合并为 1 个评价单元,将研究区划分成 19 个评价单元,使得评价更加精确。

1.2 评价指标体系与指标获取

通过建立指标体系对河流的自然性状况进行评价,有助于不同河流之间健康状况的比较,还可对受损河流生态恢复的成效进行评估,从而提高流域管理决策能力。目前,国外的河溪评价指标体系主要有澳大利亚河流评价计划(AUSRIVAS),河流无脊椎动物预测和分类系统(RIVPACS),生物完整性指数(IBI),溪流状态指数(ISC),RCE 清单,河流生态环境调查(RHS),河流健康计划(RHP)和南非的 SASS 等。这些指标体系虽能较全面地评价河溪的近自然状况,但有些因子只能进行定性描述,带有一定的主观性,降低了评价结果的可信度。此外,这些评价体系带有地域性,并不适合我国河流自然性的评价^[4-8]。

由于汤河近自然性评价需要考虑的因素很多,而各因素又不属于同一个范畴,其评价指标体系具有明显的层次性。本次评价在野外数据调查的基础上,采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)^[9-10],从地貌、生态、水文特征 3 方面挑选相对应、相互补的定量、定性共 22 个指标来构建评价指标体系。指标的选取遵循“科学性、目标性、系统性、独立性、可行性”5 项原则,评价体系包括目标层 A、准则层 B、指标层 C 这 3 层。具体指标体系和指标获取方法如表 1 所示。

1.3 评价指标权重确定

应用层次分析法,在确定了汤河近自然评价指标

体系后,咨询地貌、生态、水文学方面的专家,对准则层、指标层各因子的相对重要性进行评估,通过构建判断矩阵、层次单排序、层次总排序、一致性检验 4 个步骤来确定准则层和指标层各指标权重(表 2)^[11]。

1.4 评价指标标准与方法

评价汤河的指标既相互独立,又有一定的关联性,既有定量指标,又有定性指标。指标的选择标准主要参考了国内的一些相关研究^[12],将定量、定性指标分别赋值打分,分为自然型(4 分)、近自然型(3 分)、退化型(2 分)、人工型(1 分)4 级^[13-16],定量、定性评价标准见表 3—4。

采用多目标线性加权函数法,即综合评分法进行评价,由于汤河生态系统近自然评价指标体系中的每一个单项指标都代表了河溪生态系统不同的特点,因此需要从指标层→准则层→目标层进行综合评价。将各个评价指标因子的权重值与各个评价指标的等级分值进行层次加权计算,得到生态系统自然性综合评价指数^[17-18]。

$$N = \sum_{i=1}^3 D_i \sum_{j=1}^m D_j F_{ij}$$

式中: N ——调查点河流生态系统自然性综合评分值; D_i ——第 i 个准则层的权重; D_j ——第 j 个指标在该准则层所占的权重; F_{ij} ——第 i 个准则层中选取的第 j 个指标的评分值; m ——指标层中指标的个数。

当 N 处于 3.25~4.00 时,该河流处于自然状态,属于第 1 等级自然型。当 N 位于 2.50~3.25 时,则认为其生态系统已经受到轻微的人类活动的侵扰,属于第 2 等级近自然型;而当 N 位于 1.75~2.50 时,就判定该河流生态系统已经受到剧烈的人类活动的侵扰,属于第 3 等级退化自然型; N 处于 1.00~1.75 时的河流被认为是人工状态的,属于第 4 等级人工型。 N 的最终的评价值越高,则表明流域生态系统受到的人为干扰越小,环境越自然。

2 评价结果分析

2.1 汤河近自然评价分析

根据 2007、2008 年监测数据、实地调查结果并结合上述评价方法,计算出 19 个调查河段及总体的自然度,得出汤河自然性评价图。

汤河 19 个河段有 3 个处于人工状态,6 个河段处于退化状态,6 个河段处于近自然状态,4 个河段处于自然状态,自然性评价总得分为 2.764 分。

虽然自然性评价整体分值属于近自然状态,表明汤河流域受人干扰微弱,但有部分区段已是退化型、人工型,应当引起有关部门的关注,采取必要的生态修复措施。

表 1 汤河近自然性评价指标体系与指标获取方法

目标层 A	准则层 B	指标层 C	指标获取方法
小流域生态系统自然性定量定性评价	地貌特征	水体与河床接触情况	丰水期在近河岸布设 1 m×1 m 样方,按照蛇形布点法在样方内布点 50 个,然后用测杆探测水体是否直接与土地接触
		弯曲度	河段弯曲长度/河段的直线长度
		深度比	河段的最大深度/河段最小深度
		宽度比	河段水体的最大宽度/河段水体的最小宽度
		河床材质透水性	考察组成河床材料的颗粒大小以及材料的多样性
		两岸土地利用方式	考察距离河道最近的土地利用方式,并记录
		平面形态	考察河流曲折蜿蜒程度、河岸线形态,定性描述
		岸坡结构	岸坡的材料以及石块占护坡高度的比例
	生态特征	缓冲带植被宽度	皮尺测量,人员无法靠近区域登高俯视目测
		缓冲带结构的完整性	调查河流缓冲区域是否具备乔、灌、草 3 个空间层次
		缓冲带植物多样性	在缓冲带分别设置乔灌样方和草本样方,调查植被的多度、频度、盖度
		河岸带通达性	时间选在沿岸植被丰茂时,调查蝗虫带大于 10 m 的植被缺口数
		底栖生物生境条件	考察河水中粗木质残体的含量和腐化程度,定性描述
	河床地质 的稳定性	岸坡植被覆盖程度	考察植被覆盖度和多样性水文特征
		流速比	河段水体流速的最大值/河段水体流速的最小值
		溶解氧	水质监测方法
		总氮氮	水质监测方法
		磷酸盐	水质监测方法
		pH 值	水质监测方法
		气味	考察河水是否有腥臭味,定性描述
		流速多样性	调查河道比降是否多变
清澈程度	采用改进彩盘法调查测量		

表 2 汤河近自然性评价指标权重

目标层 A	准则层 B	权重 B_w	指标层 C	权重 C_w
定量评价 A_1 权重为 0.5	地貌特征 B_{1-1}	0.33	水体与河床接触情况	0.230 8
			弯曲度	0.230 8
			深度比	0.461 5
			宽度比	0.076 9
	生态特征 B_{1-2}	0.56	缓冲带植被宽	0.482 4
			缓冲带结构完整性	0.271 8
			缓冲带植物多样性	0.157 5
			河岸带通达性	0.088 3
	水文特征 B_{1-3}	0.11	流速比	0.077 0
			溶解氧	0.231 0
			总氮氮	0.231 0
			磷酸盐	0.230 0
			pH 值	0.231 0
定性评价 A_2 权重为 0.5	地貌特征 B_{2-1}	0.30	河床材料透水性	0.200 0
			两岸土地利用方式	0.133 4
			平面形态	0.333 3
			岸坡的结构	0.333 3
	生态特征 B_{2-2}	0.40	底栖生物生境条件	0.750 0
			岸坡植被覆盖程度	0.250 0
	水文特征 B_{2-3}	0.30	清澈程度	0.278 0
			气味	0.482 0
			流速多样性	0.240 0

表 3 河流近自然性定量评价标准

分类特征	评价指标	自然状态(4分)	近自然状态(3分)	退化自然状态(2分)	人工状态(1分)
地貌特征	水体与河床接触情况	0≤接触点≤10	11≤接触点≤21	22≤接触点≤40	接触点>40
	弯曲度	弯曲度≥2.5	2≤弯曲度<2.5	1.2≤弯曲度<2	弯曲度<1.2
	深度比	深度比≥3	2.5≤深度比<3	1.2≤深度比<2.5	深度比<1.2
	宽度比	宽度比≥4	2.8≤宽度比<4	1.5≤深度比<2.8	深度比<1.5
生态特征	缓冲带植被宽/m	植被宽≥15	10≤植被宽<15	3≤植被宽<10	植被宽<3
	缓冲带结构完整性	乔灌木3层均为自然生长	乔灌木3层但大部分乔木层为人工种植	乔灌木3层或灌木2层,其中的乔木层和灌木层均为人工种植	只有草本层或缓冲带全部消失
	缓冲带植物多样性	W≥3	2.5≤W<3	1.4≤W<2.5	W<1.4
	河岸带通达性	植被缺口个数为0	1≤植被缺口个数≤2	3≤植被缺口个数≤5	植被缺口个数≥6
水文特征	流速比	流速比≥3.5	2.5≤流速比<3.5	1.2≤流速比<2.5	流速比<1.2
	溶解氧(DO)	DO≥4.5	4≤DO<4.5	3≤DO<4	W<3
	总氮(NH ₃ -N)	0≤NH ₃ -N≤0.1	0.1<NH ₃ -N≤0.15	0.15<NH ₃ -N≤0.25	NH ₃ -N>0.25
	磷酸盐(TP)	0≤TP≤0.01	0.01<TP≤0.025	0.025<TP≤0.05	TP>0.05
	pH值	7.5≥pH≥6.5	6.4≥pH≥6.0	5.9≥pH≥4.5	pH≥9.5
			8.0≥pH≥7.6	9.4≥pH≥8.1	4.5≥pH

处于自然状态和近自然状态的河段位于河流的上、中及下游小部分地区。这些河段水环境良好,植被繁茂,流域管理措施恰当,因而河流的自然度较高。特别是6—8和10号河段,其原生态保存完好,河流中水草丰茂,水流速度拥有慢—深和快—浅两种特性,河岸带植被完整,较少有人为破坏,应当继续保持此状态^[19-20]。

处于退化状态的河段在整个评价范围内均有分布,且下游分布最为密集。处于人工状态的3个河段主要分布在下游。通过实地考察得知,3号河段处于退化型的原因是村民在山区河道内乱挖沙石,破坏了河滨湿地和缓冲带植被,使得河床形态发生了剧变。在同样处于退化型的5号河段,人为筑坝拦水、开沟引渠的现象比较严重,影响了自然水循环。12,13号河段内兴建了许多度假村,对河流生态系统开发强度较大,产生了较大的负面影响。此外,游客丢弃物等生活垃圾处理不当也是导致河段生态系统遭到破坏的原因。14,15号河段(评分值分别为1.55,1.21),人为干扰的痕迹更为明显,水体已出现富营养化,水流基本停滞,其评价结果为人工型。16,18号河段周边农田面积较大,致使河岸植被不完整,河床部分裸露,水陆交界区域遭受较大破坏,为退化型。17号河段(分值为1.35)地处老西沟门附近,左岸为公路,右岸为农田,已无缓冲带。

2.2 聚类分析验证

在SPSS 16.0中,输入汤河各河段13项定量指标的评分值和量化处理的9个定性评价指标评分值,再利用欧式距离法对这19个河段进行聚类分析^[21](图

1)。当 $T=4$ 时,19个评价河段可被分为{4,11,9,12,19},{3,18,5,12,13,16},{7,10,6,8}和{15,17,14}4大类。聚类分析与上述北京地区郊区自然性评价结果一致,证明了该评价方法的可行性。

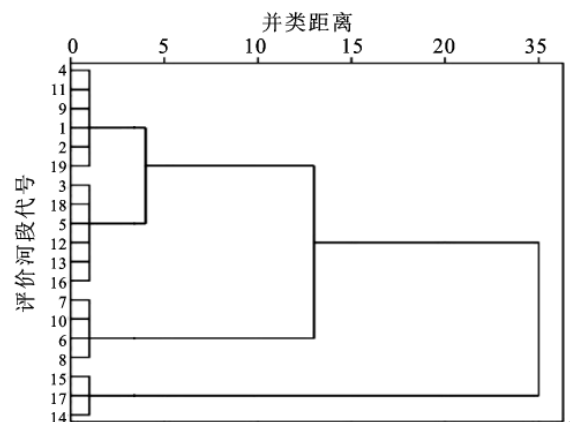


图 1 汤河各评价河段自然性聚类树形图

3 结论

本文构建了由定量、定性指标组成的自然性评价体系。在划分汤河河段的基础上,运用层次分析法(AHP),从地貌、生态、水文特征3个方面进行了自然性评价。在所评价的19个河段中,处于自然、近自然、退化自然、人工化状态的河段分别占总河长的32.3%,35.7%,23.7%和8.4%,说明汤河总体上处于近自然状态。聚类分析结果与综合评价结果高度一致,证明了该评价体系的精确性和可行性,可在京郊其他河流评价时推广应用。

表 4 河流近自然定性评价标准

分类特征	评价指标	自然状态(4分)	近自然状态(3分)	退化自然状态(2分)	人工状态(1分)
地貌特征	河床材料透水性	河床材料由透水性较强的卵石、砾石等材料构成,为不同粒径卵石的组合,完全自然,与河床物质相接触的可能性未受到扰动。	河床材料具有一定透水性,其颗粒大小和组成基本自然,河床与河底接触处有少量人为干扰,如简单的铺设石块等等。	河床材料透水性差,由于人为影响造成河底物质的单一,其颗粒大小和组成基本一致,由于浆砌石等惰性材料的存在与河底母质接触大大减少。	河床材料无透水性,由钢筋混凝土、沥青、浆砌石、管道等光滑的惰性材料铺砌的河底平滑、单一、无形态差别,与河底母质物接触的可能性为 0。
	两岸土地利用方式	休憩用地,两岸的土地主要为林地(天然或人工)或山体,无生产、生活活动痕迹。	农业用地(农田),两岸的土地主要为农田,特别是高秆的庄稼,靠近河边有部分林地存在。	交通用地(道路),两岸距离河边最近的土地利用方式为道路,道路存在侵占了河岸带的存在外围,可有一定量农田,但无林地存在。	建筑用地(民宅),两岸的土地主要为附近居民的住宅,并伴随有一定的交通用地存在。
	平面形态	河道蜿蜒曲折,多急弯、卡口,必然有天然的凸岸、凹岸、边滩、心滩,两岸和河心常有突出的巨石,河岸曲折不齐,宽度变化大。	河道保持一定的弯曲度,有人工改造的痕迹,急弯、卡口大量消失,存在少量的边滩、心滩,河岸线仍有不规则性,有一定的宽度变化。	河道趋向平直,有明显人工改造的痕迹,急弯、卡口、边滩、心滩完全消失,河岸线有一定变化,宽度趋向一致。	河道平直,无弯度变化,急弯、卡口、边滩、心滩完全消失,河岸线平直,无凸岸、凹岸,且宽度一致。
	岸坡的结构	天然植被护坡,河岸护坡由天然的植被和石块构成,无人为干扰痕迹,上游由于地处深山,相对陡峭,中下游地势相对较低,护坡的坡度也比较平缓。	长草堆石护坡,存在人为干扰的痕迹,但自然恢复较好,堆石上已长满天然植被(草本);(自然恢复至少需要 5 a 以上)。	堆石护坡,人为干扰痕迹明显,且还未得以恢复自然风貌,可能护坡上拥有一定量植被,但多数为人工种植,天然生长的植物量很少。	浆砌石或干砌石护坡,护坡陡峭、平滑,基本无植物生存。
生态特征	底栖生物生境条件	超过 50% 的河床底质都适宜底栖动物生存,河床富集各种粗木质残体,如倾倒的树干、树枝、树叶等,且已经分解,底栖生物可以立即筑巢生活。	30%~50% 的河床底质适宜底栖生物生存,但空间也能满足当点底栖生物群落,河床堆积大量新落入水中的枝叶,但需要一定时间的分解以利于底栖生物筑巢。	10%~30% 的河床底质适宜底栖生物生存,其空间已经不能满足该处底栖生物群落的正常生存、发展,且底质经常受到侵扰、变动。	不到 10% 的河床底质中底栖生物能够生存,其生境破坏十分明显,底质十分不稳定或者基本没有河床底质存在。
	岸坡植被覆盖程度	超过 90% 的岸坡均被本土植物覆盖,包括乔木、灌木、草本和非木质的菌类,基本见不到因放牧或农业活动所造成的损伤,所有植物均处于自然生长状态。	70%~90% 的岸坡被本土植物覆盖,但没有优势种,存在少量损伤但不影响整个植被的生长,且会在短期内得以恢复,超过 1/2 受损植物的残茬遗留在原地。	30%~70% 的岸坡被植物覆盖,损伤十分明显,随处可见因为放牧所造成的裸露斑块,大部分受损植物的残茬都被销毁。	仅有不到 30% 的岸坡被植物覆盖,植被的破坏情况非常严重,所有受损植物的残茬均被销毁。
水文特征	清澈程度	河水无色透明,可以存在少量天然杂质,如小型水藻、浮游生物等。	河水基本无色,但含有大量泥沙,藻类的数量要大于自然状态,水面上有少量浮萍等浮游植物,仅有不到 10% 的地区被其覆盖。	有色轻微浑浊,其中藻类的数量大大增加,10%~30% 水面已经被浮游植物所完全覆盖,并且生长着,可以零星见到一些人为杂质,如塑料袋碎片等。	有色浑浊,水中富含厌氧性藻类,超过 30% 水面已经完全被浮游植物所,例如浮萍所覆盖,水体中含有大量的人为杂质,如塑料袋、泡沫、各种垃圾等。
	气味	河水无味。	河水微腥。	河水微臭。	河水腥臭。
	流速多样性	河溪内存在天然形成的跌水、急流、缓流等不同流态,流速变化大。	河道内天然形成的跌水、急流、缓流明显减少,开始出现人工形成的规则性跌水存在,流速有一定变化。	河道内天然形成的跌水、急流、缓流完全消失,仅在部分地区有小规模的跌水存在,流速缓慢且基本一致。	河道内无任何形式的跌水、急流、缓流,流速接近于为 0。

此次评价所选河段为汤河主干道,未对其支流进行调查、评价。河流生态系统自然性评价受到诸多因素影响,由于条件有限,此次评价采集的数据还不全面,有待以后进一步扩大调查范围和增加调查内容。通过自然性评价可知,汤河今后的工作重点应放在加大重点区域、河段的治理力度上。可通过生态恢复和营造水源涵养林的途径,解决因乱挖沙石造成的河床生态破坏问题。要重点监管河流周边的农田开垦及化肥使用量,减少水体污染。对于民俗旅游要加强规范化管理,使经营项目过程中产生的污染物达标排放。对于处于自然、近自然状态的区段,要做好保护工作。

[参 考 文 献]

- [1] 陈明曦. 应用景观生态学原理构建城市河道生态护岸[J]. 长江流域资源与环境, 2007, 16(1): 97-101.
- [2] 高甲荣. 近自然治理: 以景观生态学为基础的治理工程[J]. 北京林业大学学报, 1999, 21(1): 78-82.
- [3] 高阳, 高甲荣, 陈子珊, 等. 河溪近自然治理评价指标体系探讨以及应用[J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 404-407.
- [4] 温存, 高阳, 高甲荣, 等. 河溪近自然治理技术及其评价方法[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(S): 39-44.
- [5] 高阳, 高甲荣, 李付杰, 等. 基于河道—湿地—缓冲带复合指标的京郊河溪生态评价体系[J]. 生态学报, 2008(10): 5148-5160.
- [6] 高甲荣, 肖斌, 牛建植. 河溪近自然治理的基本模式与应用界限[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 84-91.
- [7] Daily G C. Natures services: societal dependence on natural ecosystems [M]. Washington D C: Island Press, 1997: 35-38.
- [8] 刘瑛. 4 种国外河溪健康评价方法评述[J]. 水土保持通报, 2009, 29(6): 40-44.
- [9] 夏继红, 胡玲. 生态河岸带功能区划的定性定量研究[J]. 水利学报, 2007(S): 542-546.
- [10] 委会品. 北京郊区河岸带自然性评价指标体系[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 161-165.
- [11] 冯泽深, 高甲荣. 北京郊区雁栖河自然性定量评价[J]. 中国农村水利水电, 2008(10): 14-17.
- [12] 高甲荣, 冯泽深, 高阳, 等. 河溪近自然评价方法与应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010: 70-74.
- [13] 耿雷华. 健康河流的评价指标和评价标准[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 253-258.
- [14] Christian K F, Daniel H. Community structure or function: effects of environmental stress on benthic macro invertebrates at different spatial scales [J]. Freshwater Biology, 2007, 52(7): 1380-1399.
- [15] Moddock J. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health [J]. Freshwater Biology, 1992, 41(2): 373-391.
- [16] 夏继红, 严忠民, 蒋传丰. 河岸带生态系统综合评价指标体系研究[J]. 水科学进展, 2005, 16(8): 345-348.
- [17] Daniel H, Otto M, Leonard S, et al. Overview and application of the AQEM assessment system [J]. Hydrobiologia, 2004, 516(1): 1-20.
- [18] 高甲荣, 王芳. 河溪生态系统自然性评价指标体系[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(5): 66-70.
- [19] 欧阳志云, 王如松. 生态系统服务功能、生态价值与可持续发展[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 14(5): 45-55.
- [20] 董哲仁. 保护和恢复河流形态多样性[J]. 水利学报, 2003, 37(11): 53-56.
- [4] Malcolm E, Sumner R N. Sodic soils-distribution, properties, management, and environmental consequences [M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [5] 翟明普, 贾黎明, 沈国舫. 杨树刺槐混交林及树种间作用机制的研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997: 3-10.
- [6] 张鼎华, 孙志蓉, 翟明普, 等. 杨树刺槐混交林沙地土壤的水分-物理性质[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(2): 122-125.
- [7] 魏忠平, 于雷, 潘文利, 等. 泥质海岸混交林对土壤物理性质的影响[J]. 辽宁林业科技, 2010(1): 21-23.
- [8] 曹邦华, 吴丽云, 宋爱云, 等. 滨海盐碱地刺槐混交林土壤水盐动态[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 939-945.
- [9] 曹邦华, 吴丽云. 滨海盐碱地刺槐白蜡混交林土壤酶与养分相关性研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 128-133.
- [10] 胡海波, 梁珍海. 淤泥质海岸防护林的降盐改土功能[J]. 东北林业大学学报, 2001, 29(5): 34-37.
- [11] 张万儒, 许本彤. 森林土壤定位研究法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986: 3-5.
- [12] 镇常青. 多目标决策中的权重调查确定方法[J]. 系统工程理论与实践, 1987, 7(2): 16-24.
- [13] 薛薇. SPSS 统计分析方法及应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004: 326-348.
- [14] 孟康敏, 杨秀清, 潘文利, 等. 辽宁滨海盐碱地土壤改良及造林技术研究[J]. 林业科学, 1997, 33(1): 25-33.
- [15] 邹桂梅, 黄明勇, 苏德荣, 等. 滨海盐碱地城市绿地土壤肥力的时空变化特征[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 110-115.
- [16] 郝金标, 邢尚军, 宋玉民, 等. 黄河三角洲不同造林模式下土壤盐分和养分的变化特征[J]. 林业科学, 2007, 43(S1): 33-38.
- [17] 万福绪, 杨东. 苏北海堤杉木杨树混交林林木生长及土壤肥力研究[J]. 南京林业大学学报, 2006, 30(2): 43-46.

(上接第 110 页)