

河岸植被缓冲带完整性及恢复措施

——以北京市密云水库上游潮白河流域为例

杨波, 齐实, 孙嘉, 张海龙

(北京林业大学 水土保持学院 教育部水土保持与荒漠化防治重点实验室, 北京 100083)

摘要: 通过对潮白河流域 22 个断面的调查分析, 根据潮白河河道断面形态、河岸土地利用类型及岸坡坡度等条件, 将潮白河河道断面划分为: U 形+缓坡、U 形+陡坡、U 形+陡坎、V 形+陡坡和漫滩型, 并对潮白河河岸植被缓冲带完整性进行了评价。结果显示, 潮河河段内植被缓冲带完整性较差, 以次不完整状况为主; 白河河段内河岸植被缓冲带状况相对较好, 大部分调查断面内植被缓冲带为基本完整及完整状态。针对潮白河河岸植被缓冲带存在的问题, 提出了潮白河流域不同河岸带断面类型植被缓冲带的恢复对策。

关键词: 河岸植被缓冲带; 河岸断面; 完整性评价; 植被恢复

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)04-0178-06

中图分类号: S157, TV861

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2014.04.049

Integrity and Restoration Countermeasures of Riparian Vegetation Buffers

— A Case Study on Chaobai River Basin in Up-stream of Miyun Reservoir in Beijing City

YANG Bo, QI Shi, SUN Jia, ZHANG Hai-long

(Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: After investigating 22 river cross-sections in Chaobai River basin, according to the river section morphology, riparian land use types, riparian slope and other conditions, the river section morphology was divided into U-shaped + gentle slope, U-shaped + steep slope, U-shaped + scarp, V-shaped + steep slope and flood-plain-types. Furthermore, the riparian forest buffers integrity of Chaohe River was assessed. The results showed that the vegetation buffer in poor condition in Chaohe River, mainly seq-incomplete; riparian forest buffers in relatively good condition within Baihe River, most of the investigation sections of the vegetation buffer were in basic integrity and integrity state. According to the existing problems, restoration countermeasure of different river section in Chaobai River basin was put forward.

Keywords: riparian vegetation buffer; river cross-section; integrity assessment; vegetation restoration

河岸植被缓冲带处于水陆交界区, 具有明显的边缘效应, 是地球生物圈中最复杂的生态系统之一, 与相邻的生态系统相比, 具有较强的景观异质性与多样性, 可以提供丰富的野生动植物资源、地表和地下水资源、气候资源以及休闲、娱乐和观光旅游资源等^[1-3]。

河岸植被缓冲带作为河岸带生态系统的一部分, 在河流防洪、河流水质保护、河岸带生境保护等方面起着重要作用^[4-5]。Mayer^[6]等的研究表明, 在河岸宽度大致相同的条件下, 以草本或以乔草、灌草混合模式营造的缓冲带在贮氮方面效果显著。Dillaha 和 Castelle 的研究结果^[7-8]表明 3~5 m 的植被缓冲带能够拦截 50%~80% 的污染物。随着人口的剧增和

社会经济的发展, 大量河岸植被缓冲带遭到了人为的干扰, 其完整性受到破坏, 造成河流防洪能力减弱, 水质下降, 河岸带生态环境恶化等问题^[4]。因此, 河岸植被缓冲带恢复逐渐成为近年来的研究热点。研究^[9]表明, 针对植被缓冲带恢复的配置模式需要考虑植物品种、结构、布局和缓冲带的位置及宽度指标, 以充分发挥其生态、经济功能。正常情况下, 需要综合考虑河流的水文特征来进行河岸缓冲带的设置, 以达到经济和生态的双重效益^[10-11]。潮白河是北京地区重要的水源地之一, 因此对河岸的有效管理与保护, 对已遭到破坏的河岸植被带进行恢复与重建, 以充分发挥其河岸的重要功能, 已成为河流管理者需要去考虑的对策。因此, 本研究以潮白河流域 22 个河

收稿日期: 2013-11-26

修回日期: 2013-12-06

资助项目: 北京市教育委员会“北京市典型河流滨水缓冲带土壤生物工程措施试验研究”

作者简介: 杨波(1987—), 男(苗族), 湖北省利川市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持。E-mail: mu_nite@126.com。

通信作者: 齐实(1964—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 教授, 主要从事水土保持、流域管理研究。E-mail: qishi@bjfu.edu.cn。

岸断面为研究对象,通过对河岸植被带调查及完整性评价,并针对各断面类型提出了不同的河岸植被缓冲带恢复措施进行探讨,以期对河岸植被缓冲带恢复的相关研究和实践提供参考价值。

1 研究区概况

研究区选择在北京市密云水库上游潮白河水系,包括潮河、白河,地理位置范围为东经 $115^{\circ}25'$ — $117^{\circ}35'$,北纬 $40^{\circ}20'$ — $41^{\circ}37'$ 。研究区内潮河、白河水系全长约 126 km,所在的流域总面积为 $1.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。潮河发源于河北省丰宁县上黄旗北,经滦平县、古北口入北京市密云县,潮河分为密云水库上游和下游两段,上游河道长 24 km,河道纵坡为 10‰,河床糙率 0.025,河床多为砾石和砂,较为稳定,流域地貌为山地。白河发源于河北省沽源县南大马群山,经赤城县流入北京市延庆县,再经怀柔县进密云县,至高岭乡漕城子注入密云水库东北端,白河分为密云水库上游和下游两段,上游河道长 102 km,河道纵坡为 13‰,河床糙率 0.032,河床多为砾石和砂,较为稳定,流域地貌为山地。研究区所在流域气候类型属大陆性季风气候,属温带与中温带、半干旱与半湿润带的过渡带,多年平均降雨量为 492 mm,汛期(6—9月)降水量约占年降水量的 80%,年平均气温 $10 \sim 12^{\circ}\text{C}$ 。流域内土壤类型以棕壤和褐土分布最广,占总面积的 80%以上。植被类型丰富,以针阔叶混交林为主,主要的乔木有杨树、柳树、刺槐、侧柏、五角枫、杏、火炬

树等;灌木有沙棘、胡枝子、小叶女贞、紫叶小檗等;草本有紫花苜蓿、冰草、麦冬、芦苇等。

2 河岸带调查

河岸植被缓冲带调查以横断面为调查尺度,在潮河与白河主要调查河段内分别以每 3 km 的间距布置一定数量的横断面,宽度为 30~100 m(河流常水位以上受河流直接影响的植被带),最终确定调查密云水库上游潮河河段自上而下共计 6 个断面,白河河段自上而下共计 16 个断面。调查内容包括以下 3 个方面:(1)河道断面形态、岸坡坡度、岸坡高度;(2)采用样方法对河岸带内植被调查,包括植物种类、地理位置、生长状况等;(3)利用遥感影像图并结合野外土地调查的方法,调查河岸带周边土地利用现状。

3 潮白河河岸带断面类型划分

采用流域 DEM 提取水系特征信息,结合实地调查,根据河道断面形式、岸坡坡度、岸坡高度及河岸带周边土地利用现状等因素作为评价指标,对河岸带断面类型进行划分。潮白河河道断面形式主要为 U 形、V 形、漫滩型(表 1)。根据河岸上缘岸坡的坡度,将其划分为缓坡($0^{\circ} \sim 15^{\circ}$)、陡坡($15^{\circ} \sim 45^{\circ}$)、陡坎($> 45^{\circ}$)3 类。考虑到实用程度,一般划分河岸带断面结构和类型时仅考虑 2 部分,即河道类型、缓冲坡坡度,这样可得到 5 种河岸带断面类型,即 U 形+缓坡、U 形+陡坡、U 形+陡坎、V 形+陡坡和漫滩型。

表 1 潮白河河岸带断面调查结果

流域	调查断面	水系级别	河道断面形式	水面宽度/m	岸坡坡度	岸坡坡高/m	土地利用现状	植被类型
潮河	1	2 级	U 形	105.0	<15	3.34	林地	杨树
	2	2 级	U 形	30.0	<15	15.75	林地+耕地	杨树+玉米
	3	3 级	漫滩型	40.0	<5	11.31	林地+耕地	杨树+玉米
	4	3 级	漫滩型	70.0	<5	10.01	林地+耕地	杨树、柳树+玉米
	5	4 级	漫滩型	60.0	<5	19.17	林地+耕地	杨树+玉米
	6	4 级	漫滩型	30.0	<5	20.45	林地+耕地	杨树+玉米
白河	1	3 级	V 形	9.5	>35	14.53	林地	杏、油松
	2	4 级	U 形	8.5	>35	115.68	林地	杨树
	3	4 级	U 形	10.5	>35	59.33	林地	杨树、芦苇
	4	4 级	U 形	12.1	>45	29.45	林地	杨树、柳灌
	5	4 级	U 形	9.8	>45	39.60	林地	杨树、柳灌
	6	4 级	U 形	52.0	>35	67.90	林地	杨树
	7	4 级	U 形	32.8	>35	146.72	林地+耕地	杨树+玉米
	8	4 级	U 形	38.0	>35	105.70	荒草地	芦苇
	9	5 级	U 形	76.0	<15	15.89	林地	杨树
	10	5 级	U 形	33.0	<15	23.63	林地	杨树
	11	4 级	V 形	11.4	>35	10.01	林地	杨树、柳树、刺柏
	12	5 级	V 形	28.0	>35	5.95	林地	柳树
	13	5 级	U 形	18.6	<10	23.53	林地	杨树、柳树
	14	5 级	U 形	26.0	<11	6.21	林地	枣树
	15	5 级	U 形	96.0	>35	20.65	林地	杨树、柳树
	16	5 级	U 形	19.3	>45	95.35	耕地	玉米

根据表 1 综合分析可得,漫滩型断面的河道岸坡坡度均在 5° 以下,土地利用现状为林地与耕地,植被类型为杨树和玉米,结合岸坡坡度分类,将漫滩型断面的河岸植被缓冲带划分为一类,即:漫滩型河岸植被缓冲带;U 形断面的河道岸坡坡度范围较广,土地利用主要为林地,植被类型主要为杨树、柳树,结合岸坡坡度分类,可将 U 形断面的河岸植被缓冲带划分为 3 类,即:U 形+缓坡、U 形+陡坡、U 形+陡坎;V 形断面的河道岸坡坡度均大于 35° ,土地利用类型为林地,植被类型主要为杨树、柳树、刺柏,结合岸坡坡度分类,将 V 形断面的河岸植被缓冲带划分为一类,即:V 形+陡坡。经统计,22 个河岸断面中漫滩型包

括潮河断面 3,4,5,6;U 形+缓坡型包括潮河断面 1 和 2,白河断面 9,10,13,14;U 形+陡坡型包括白河断面 2,3,6,7,8,15;U 形+陡坎型包括白河断面 4,5,16;V 形+陡坡型包括白河断面 1,11,12。

潮河流域地形地貌情况比较简单,土地利用情况多以林地和耕地为主,断面形态较少,河道较宽,两岸岸坡较缓,潮河河岸植被缓冲带主要以 U 形+缓坡和漫滩型为主;而白河流域地形情况相对复杂,断面形态较多,岸坡坡度变化较大,河道宽度相比较潮河流域更窄,白河河岸植被缓冲带主要为 V 形+陡坡、U 形+陡坎、U 形+陡坡及 U 形+缓坡。各种河岸带断面类型如图 1 所示。



U形+缓坡



U形+陡坡



U形+陡坎



U形+陡坡



V形+陡坡



漫滩型+缓坡

图 1 河岸带各断面类型示意图

4 潮白河河岸植被缓冲带完整性评价

4.1 评价指标及方法

根据独立性及可操作性原则,采用多指标评价法研究潮白河河岸植被缓冲带的完整性。多指标评价

法的评估原理是,首先根据对河岸带的调查结果,制定能够反映评价目标的水文、生物、化学和物理形态等方面的评估指数,从众多反映河岸带特性的因子中根据一定的原则为每个指数选取适当的指标,为这些指标制定适当的评分标准,然后计算各项指标值的大

小,根据评分标准为各项指标打分,将各指标得分进行加权处理后得到每一项指数的分值,再将各项指数得分求和,以累计总分数作为评估依据^[12],为植被缓冲带的恢复重建提供依据。

从调查中获得的涉及河岸植被缓冲带生态系统的多种特征因子中选定植被带宽度、植被带连续性、植被层次、植被种类及植被覆盖度这 5 个指标作为评价指标,将河岸植被缓冲带完整性分为完整、基本完整、次不完整及不完整 4 个等级。河流完整性评价多将每个指标转化为满分为 10 分的得分,并以 2.5 为得分间距划分其完整性^[12-13]。评价的满分为 50 分,定义 37.5~50 分表示河岸植被缓冲带完整,25~37.5 分表示基本完整,12.5~25 分表示次不完整,0~12.5 分表示不完整(表 2)。

4.2 河岸带完整性

各项指标调查及评价结果详见表 3。潮河河段内河岸植被缓冲带状况为次不完整和不完整。主要问题为:断面 1 和 4 两岸的植被单一,主要以乔木为主,缺少草灌植被,林分结构单一,生态功能弱;断面 3 和 6 两岸主要以耕地为主,在耕地和河流水体之间

没有植被缓冲带,无法对河流水质进行有效的保护;断面 5 两岸的植被带出现了破损并且不连续,植被带的作用被削弱了。白河河段内河岸植被缓冲带状况相对较好,大部分调查断面内植被缓冲带为基本完整及完整状态,但也有一些断面的植被缓冲带呈现次不完整状态。主要问题为:断面 1 和 16 河岸植被缓冲带不连续,植被较少;断面 7,8 及 10 两岸存在荒草地,植被较少只有杂草和芦苇;断面 14 主要以经济林木及少数杨树为主缺少灌草植被,林分结构相对单一,生态功能较弱。

表 2 潮白河河岸植被缓冲带完整性评价标准

指标	分级标准			
	完整	基本完整	次不完整	不完整
完整性得分	7.5~10	5~7.5	2.5~5	0~2.5
植被带宽度/m	>50	20~50	10~20	<10
植被带连续性	连续	较连续	较不连续	不连续
植被层次	分明	较分明	较不分明	不分明
植被种类	丰富	多	较少	单一
植被覆盖度/%	>80	50~80	25~50	<25

表 3 潮白河河岸植被缓冲带调查结果及完整性评价

流域	调查断面	河岸带断面类型	植被带宽度/m	植被带连续性	植被层次	植被种类	植被覆盖度/%	分值	等级
潮河	1	U形+缓坡	<10	不连续	不分明	种类单一	30	13.0	次不完整
	2	U形+缓坡	20	较连续	较不分明	单一	35	19.0	次不完整
	3	漫滩型	50	较连续	较不分明	单一	40	22.0	次不完整
	4	漫滩型	40	较连续	较不分明	较少	35	20.0	次不完整
	5	漫滩型	<10	不连续	较不分明	单一	25	12.5	次不完整
	6	漫滩型	0	不连续	不分明	单一	30	10.0	不完整
白河	1	V形+陡坡	20	较连续	较不分明	较少	35	21.0	次不完整
	2	U形+陡坡	50	连续	较分明	多	45	35.0	基本完整
	3	U形+陡坡	30	较连续	较分明	多	40	32.0	基本完整
	4	U形+陡坎	13	连续	较分明	多	30	28.0	基本完整
	5	U形+陡坎	15	较连续	较分明	多	50	31.0	基本完整
	6	U形+陡坡	35	较连续	较分明	多	40	33.0	基本完整
	7	U形+陡坡	>50	较连续	较不分明	较少	30	23.0	次不完整
	8	U形+陡坡	20	较连续	较不分明	较少	30	20.5	次不完整
	9	U形+缓坡	>50	连续	较分明	多	45	37.0	基本完整
	10	U形+缓坡	10	较连续	不分明	单一	25	12.5	次不完整
	11	V形+陡坡	20	连续	分明	多	40	32.5	基本完整
	12	V形+陡坡	50	连续	分明	多	45	37.5	完整
	13	U形+缓坡	13	连续	分明	多	45	32.0	基本完整
	14	U形+缓坡	11	较连续	较不分明	较少	30	15.0	次不完整
	15	U形+陡坡	30	较连续	较分明	多	35	30.5	基本完整
	16	U形+陡坎	10	不连续	较不分明	较少	25	12.0	次不完整

5 潮白河河岸植被缓冲带恢复对策

潮白河河岸植被缓冲带的恢复立足于河岸的自然条件、功能要求、立地类型,并依据适地适树原则、可行性原则、区域性与典型性原则、生态经济原则选择适宜在北京地区建设缓冲带的植物种类。依据河岸植被系统的结构特点,运用生态学原理(生物共生、

生物多样性,生态系统的结构)和经济学原理(自然资源,合理利用,生态经济效益)充分利用河岸已存植被,构建高效河岸植物群落,使植物生态恢复与经济利用和谐统一。

根据潮白河不同河岸带断面类型的划分结合河岸植被缓冲带现状,提出潮白河流域不同河岸带断面类型植被缓冲带恢复对策(表 4)。

表 4 潮白河流域不同河岸带断面类型植被缓冲带恢复对策

断面类型	存在问题	植被缓冲带恢复对策	采用的主要植物种
U 形+缓坡	植被构成单一	(1) 植被带过窄,要加宽植被带,以提高其抵御危害,减少水土流失的能力 (2) 应利用现存杨树,种植杨树+刺槐的混交林进行林分改造,提高缓冲带的稳定性和抗灾害能力 (3) 增加灌木层,栽培沙棘,胡枝子等灌木,增加植被层次 (4) 由于土地贫瘠,土层薄,比较干旱,应以灌木草本为主,减少乔木种植密度,利用灌草改良土壤,也可减少乔木之间的竞争关系,提高成活率	乔木:杨树、刺槐 灌木:沙棘、胡枝子 草本:芦苇
U 形+缓坡	存在大量荒地	主要进行灌木草本恢复,可沿岸种植整齐的芦苇+麦冬群,美化环境,提供游客休息玩耍的地带	灌木:紫叶小檗、胡枝子 草本:芦苇、麦冬
U 形+陡坡	植被构成单一	(1) 杨树林生长密集,林下没有灌木,甚至草本植物也很少。应合理间伐,再补种杏树,构成混交林。在林下补植灌木丛 (2) 对于新栽种的乔木和灌木要采取封禁措施,防止村庄内的牲畜破坏	乔木:杏树 灌木:紫叶小檗、胡枝子
U 形+陡坡	存在大量荒地、植被稀少	(1) 在农田和河流间补种植被,可采用柳树+杨树+侧柏的组合,符合该样本点的天然植被组成。再种植沙棘+紫穗槐+芦苇构成乔灌草的植被组成,用以稳定河岸带生态 (2) 在山坡上植被相对稀疏的地方设置梯田,种植灌草和侧柏等小型乔木,防止水土流失	乔木:柳树、杨树、侧柏 灌木:沙棘、紫穗槐 草本:芦苇
U 形+陡坎	植被带不连续、植被稀少	根据现有植被带组成进行补植,保持植被缓冲带的连续性和完整性。可采用灌木+草本植被的模式	灌木:紫穗槐、胡枝子 草本:麦冬
V 形+陡坡	植被带不连续、植被稀少	(1) 根据现有植被带组成进行补植,保持植被缓冲带的连续性和完整性。可采用灌木+草本植被的模式 (2) 在山坡上植被相对稀疏的地方设置梯田,种植灌草和侧柏等小型乔木,防止水土流失	乔木:侧柏 灌木:沙棘、紫穗槐 草本:麦冬
漫滩型	植被结构单一	(1) 利用现存杨树,种植杨树+刺槐的混交林进行林分改造; (2) 增加灌木层,栽培沙棘,胡枝子等灌木,增加植被层次	乔木:杨树、刺槐 灌木:沙棘、胡枝子
漫滩型	存在大量耕地,耕地与河流间无缓冲带	(1) 采用杨树+刺槐+五角枫的组合,均为当地适宜植被,组成混交林又对彼此有利。(2) 种植沙棘+紫穗槐+芦苇+麦冬构成乔灌草的植被组成	乔木:杨树、刺槐、五角枫 灌木:沙棘、紫穗槐 草本:麦冬、芦苇
漫滩型	植被稀少	采用种植灌草结构来减少水土流失。可采用紫叶小檗+胡枝子+芦苇的组合,这几种植被适应性强,而且耐阴耐湿,适合作为护坡植被	灌木:紫叶小檗、胡枝子 草本:芦苇

6 结论

(1) 采用流域 DEM 提取水系特征信息,结合实地调查,根据河道断面形式、岸坡坡度、岸坡高度及河岸带周边土地利用现状等因素作为评价指标,将河岸带断面划分为 U 形+缓坡、U 形+陡坡、U 形+陡

坎、V 形+陡坡和漫滩型 5 种类型。

(2) 采用多指标评价方法对潮白河河岸植被缓冲带进行完整性评价,结果显示潮河河段内植被缓冲带状况较差,以次不完整为主;白河河段内河岸植被缓冲带状况相对较好,大部分调查断面内植被缓冲带为基本完整及完整状态。

(3) 根据潮白河不同河岸带断面类型的划分结合河岸植被缓冲带现状,提出了不同断面类型的植被缓冲带恢复对策,并选择了适宜的植物种。

[参 考 文 献]

- [1] Naiman R J, Decamps H, Pollock M. The role of riparian corridors in maintaining regional biodiversity [J]. *Ecological Applications*, 1993, 3(2):209-212.
- [2] 张建春. 河岸带功能及其管理[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6):143-146.
- [3] 夏继红, 严忠民. 生态河岸带的概念及功能[J]. *水利水电技术*. 2006, 37(5):14-17, 24.
- [4] Correll D L, Jordan T E, Weller D E. Nutrient flux in a landscape: Effects of coastal land use and terrestrial community mosaic on nutrient transport to coastal waters[J]. *Estuaries*, 1992, 15(4): 431-442.
- [5] Lowrance R, Altier L S, Newbold J D, et al. Water quality functions of riparian forest buffers in Chesapeake Bay watersheds[J]. *Environmental Management*, 1997, 21(5): 687-712.
- [6] Mayer P M, Reynolds S K, Mccutchen M D. Meta-Analysis of nitrogen removal in riparian buffers[J]. *Journal of Environmental Quality*. 2007, 36(4):1172-1180.
- [7] Castelle A J, Johnson A W, Conolly C. Wetland and stream buffer size requirements: A review [J]. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23(5):878-882.
- [8] Dillaha T A, Reneau R B, Mostaghimi S, et al. Vegetative filter strips for agricultural nonpoint source pollution control[J]. *Transactions, American Society of Agricultural Engineers*, 1989, 32(2):513-519.
- [9] Lee P, Smyth C, Boutin S. Quantitative review of riparian buffer width guide lines from Canada and the United States [J]. *Environmental Management*, 2004, 70(2): 165-180.
- [10] Woessner W W. Stream and fluvial plain ground water interactions; Rescaling hydrogeologic thought [J]. *Ground Water*, 2000, 38(3):423-429.
- [11] 曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 等. 河岸植被缓冲带的功能及其设计与管理[J]. *林业科学*, 2010, 46(2):45-47.
- [12] 王劲修, 齐实, Zhang Yaoqi, 等. 山西沁河上游河岸植被缓冲带评价与恢复重建研究[J]. *湖南农业科学*, 2011(11):115-119.
- [13] 张峥. 京杭大运河宿豫段河岸植被缓冲带综合评价[J]. *农业科技与信息*, 2013, 10(3):42-49.
- [10] Shi Minglun, Cheng Yongping. Determination of permeability using fractal method for porous media [J]. *Science in China(E): Technological Sciences*, 2001, 44(6):625-630.
- [11] 熊承仁, 唐辉明, 刘宝琛, 等. 利用 SEM 照片获取土的孔隙结构参数[J]. *中国地质大学学报*, 2007, 32(3): 415-419.
- [12] 吴恒, 张信贵, 易念平. 水土作用与土体微观结构研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2000, 19(2):199-204.
- [13] 施斌, 李生林. 黏性土微观结构 SEM 图像的定量研究[J]. *中国科学(A): 数学*, 1995, 25(6):666-672.
- [14] 赵安平, 王清, 李杨, 等. 长春季冻区路基土微观孔隙特征的定量评价[J]. *工程地质学报*, 2008, 16(02):233-238.
- [15] 李德成, Velde B, 张桃林. 利用土壤切片的数字图像定量评价土壤孔隙变异度和复杂度[J]. *土壤学报*, 2003, 40(5):678-682.
- [16] 闫小庆, 房营光, 张平. 膨润土对土体微观孔隙结构特征影响的试验研究[J]. *岩土工程学报*, 2011, 33(8): 199-204.

(上接第 177 页)

- [2] 宁万辉, 宁健, 俞美华, 等. 降雨对碎石土边坡稳定性的影响分析[J]. *水电能源科学*, 2011, 29(1):83-85.
- [3] 许建聪, 尚岳全. 碎石土渗透特性对滑坡稳定性的影响[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(11):2264-2271.
- [4] Tovey N K. Quantitative analysis of electron micrographs of soil structure [C]// Minter national Symposium on Soil Structure. Stockholm; Swedish Geotechnical Institute, 1973.
- [5] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone Pores; Implications for conductivity and Pore formation[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1985, 54(12):1325-1328.
- [6] 方祥位, 申春妮, 汪龙, 等. Q_2 黄土浸水前后微观结构变化研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(5):1319-1324.
- [7] 王宝军, 施斌, 刘志彬, 等. 基于 GIS 的黏性土微观结构的分形研究[J]. *岩土工程学报*, 2004, 26(2):244-247.
- [8] 黄丽. 饱和软黏土微观孔隙的定量分析及其分形研究[D]. 湖北 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [9] 许勇, 张季超, 李伍平. 饱和软土微结构分形特征的试验研究[J]. *岩土力学*, 2007, 28(S):49-52.