

扰动边坡植被恢复过程中的土壤性质演变

赵自超^{1,2}, 夏振尧¹, 熊诗源³, 吴彬^{1,2}, 许文年¹

(1. 三峡大学 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002;

2. 三峡大学 化学与生命科学学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 湖北中孚化工集团, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 采用空间代替时间法研究了扰动边坡植被恢复过程中的土壤性质演变。结果表明, 扰动边坡植被恢复过程中土壤含水量呈上升趋势, 土壤容重呈下降趋势。随着植被的恢复, 土壤物理性质逐渐改良。土壤有机质、全氮、速效氮、微生物量碳、微生物量氮、土壤呼吸呈上升趋势。全磷和全钾变化趋于稳定, 速效磷和速效钾随着植被恢复演替在前期呈现增加的趋势, 随后又降低, 最后趋于稳定。土壤微生物呼吸速率随着植被恢复年限的增加呈上升趋势, 说明植被在恢复过程中, 土壤的熟化程度越来越高。

关键词: 边坡; 植被恢复; 土壤性质

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)05-0082-05

中图分类号: S151.9, S153.4

Evolution of Soil Properties in Vegetation Restoration Process on Disturbed Slopes

ZHAO Zi-chao^{1,2}, XIA Zhen-yao¹, XIONG Shi-yuan³, WU Bin^{1,2}, XU Wen-nian¹

(1. Engineering Research Center for Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region of the Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. College of Chemistry and Life Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3. Hubei Chungfu Chemical Group, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: By taking disturbed slopes as research sites, soil quality characteristics during community succession on disturbed slopes were studied by the method "space substitute for time". The main conclusions are as follows: During the process of vegetation restoration, soil moisture rose and soil bulk density declined, which indicate that soil physical properties were gradually improved. Soil organic matter, total nitrogen, available nitrogen, soil microbial biomass carbon(MBC), soil microbial biomass nitrogen(MBN) and soil respiration showed an upward tendency, while total phosphorus and total potassium showed a stable state. Available phosphorus and available potassium in vegetation restoration succession increased in prophase and then decreased to a tendency toward stabilization. Soil microbial respiratory rate showed an upward trend with succession. Soil activation became more and more evident.

Keywords: slope; vegetation restoration; soil property

土壤是生态系统的重要组成成分, 而且还是重要的生态因子, 为生态系统中生物的生长发育、生存和繁殖提供最基本的环境条件和物质基础^[1]。土壤作为植物生长的基质和环境, 一方面对植物起固着作用, 另一方面为植物的生长提供水、热、气、肥等条件。土壤的物理、化学性质及演化趋势直接影响着植物的生长发育和群落的演替动态^[2-3], 影响着植被结构^[4]和植被生产力^[5]。土壤的生物性质在土壤中的各种生态系统服务中发挥着重要作用^[6-7]。

工程扰动导致自然生境大量丧失, 植物赖以生存

土壤和环境遭到破坏, 为了加速扰动区域的生态恢复, 研究开发了一系列的工程扰动区植被恢复技术^[8-10]。目前工程扰动区植被恢复技术, 考虑较多的是修复基材在扰动坡体上的稳定性、先锋物种在修复基材中的适应性等方面, 侧重于对修复基材配合比研制和施工工艺改进等方面的工程技术研究^[11-14]。而对工程扰动区生态恢复不同阶段的土壤性质变化规律研究较少。本研究以工程扰动边坡植被恢复为研究对象, 采用“空间代替时间的方法”选取不同类型的群落来代表不同的恢复阶段, 从而建立时间演替序

收稿日期: 2012-11-28

修回日期: 2012-12-26

资助项目: 科学技术部“十二五”科技支撑项目“金沙江梯级水电开发区生态保护与入库泥沙调控关键技术与示范: 河岸工程施工区生态系统修复技术与示范”(2012BAC06B02-04); 国家自然科学基金项目“植被混凝土生态防护基材活性增强机理研究”(51278281)

作者简介: 赵自超(1987—), 男(汉族), 山东省莘县人, 硕士研究生, 主要研究方向为生态工程与恢复生态学。E-mail: 2008zxc@163.com。

列,通过对这些代表不同恢复阶段的土壤因子进行较为系统的测定,从而确定植被恢复过程中土壤性质的演变规律以探求人工植被的恢复机理,同时也为人工加快植被恢复进程和实现工程扰动区的可持续发展提供科学的依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

宜昌市,长江中游的起点、鄂西秦巴山脉和武陵山脉向江汉平原的过渡地带,地理坐标为东经 $110^{\circ}15'$ — $112^{\circ}04'$,北纬 $29^{\circ}56'$ — $31^{\circ}34'$ 。全区四季分明,春秋较长,年平均降水量为 $992.1\sim 1\,404.1\text{ mm}$,雨水丰沛,多在夏季 6—7 月。雨热同期,全年积温较高,无霜期较长,年平均气温为 $13.1\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。境内的土壤主要是黄壤。

1.2 研究方法

采取植被演替空间排列顺序推断时间演替顺序,

选取 8 个样地分别代表群落演替的各个阶段,各样地的土壤均为黄壤。样地情况如表 1 所示。每个样地设置 5 个 $2\text{ m}\times 2\text{ m}$ 样方,分别在每个样地的样方内用土钻随机取 0—20 cm 土层的土样各 5 个,混合为一个土样。迅速捡去枯枝落叶后分为两部分,一部分自然风干用于土壤物理化学特性的分析,另一部分在低温的条件下运到实验室内过 2 mm 的筛后装在密闭容器内,放置在 $0\sim 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的冰箱内保存用于土壤微生物量的分析。

土壤容重用环刀法测定,酸碱度采用电位法测定,有机质用重铬酸钾容量法—外加热法测定,全氮和碱解氮利用扩散吸收法测定,速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO_3 溶液浸提—钼锑抗比色法测定,速效钾采用火焰光度法测定,土壤微生物碳和氮采用氯仿熏蒸浸提法测定,土壤基础呼吸采用室内恒温培养、碱液吸收法测定。数据先用 WPS 2010 表格统计,然后用 SPSS 17.0 数据分析和统计软件分析。

表 1 样地基本情况

编号	海拔/ m	坡度/ ($^{\circ}$)	坡向	年限/a	物种分布情况
SP ₁	96	6	NE11 $^{\circ}$	1	物种组成简单,共有 5 科 10 属 10 种。禾本科,菊科、桑科、莎草科和大戟科进入,禾本科的种属数占到全部种属数的 60%。
SP ₂	72	43	NW10 $^{\circ}$	3	物种明显增加,科属种的丰富度都增加。禾本科种属数降低,菊科种属数增加,此外,新增豆科、伞形科、肾蕨科、马鞭草科、樟科及蓼科各一种,莎草科物种退出。
SP ₃	82	78	NW20 $^{\circ}$	6	物种进一步增加,为 11 科 16 属 16 种。禾本科、菊科种属数变化不大,新增无患子科、漆树科、鸭跖草科、忍冬科、茜草科、葡萄科各一种。豆科、伞形科、马鞭草科、樟科退出。
SP ₄	80	68	ES20 $^{\circ}$	7	物种数有所降低,为 8 科 12 属 13 种。禾本科、菊科和桑科种属变化不大,新增蔷薇科、木贼科和凤尾蕨科,而蓼科、无患子科、漆树科、鸭跖草科、忍冬科、葡萄科退出。
SP ₅	71	64	WS14 $^{\circ}$	10	物种数增加。禾本科增加,豆科、樟科漆树科重新进入,并新增棕榈科、苦苣苔科。
SP ₆	72	53	NE62 $^{\circ}$	12	物种数呈下降趋势,为 9 科 9 属 9 种。禾本科和菊科数剧烈下降,剩禾本科 1 属 1 种,无患子科、茜草科重新进入,新增酢浆草科、苋科、鸢尾科、百合科、木犀科。
SP ₇	78	23	ES20 $^{\circ}$	20	物种数几乎成倍增加。禾本科全部退出,伞形科、肾蕨科、马鞭草科、蓼科、茜草科、蔷薇科、木贼科、棕榈科重新进入,酢浆草科、苋科、鸢尾科、木犀科退出,新增鳞毛蕨科、芸香科、海金沙科。
SP ₈	113	48	WN12 $^{\circ}$	50	物种数进一步增加,为 17 科 22 属 23 种。禾本科、菊科重新进入,新增柏科、楝科及车前草科。

2 结果与讨论

2.1 群落演替各阶段土壤水分和容重变化

土壤水分是土壤的重要组成部分,对植物的生长发育起着重要作用,水是土壤肥力诸因素中最活跃的

因素,它除提供植物直接吸收利用外,还影响微生物的生命活动,养分的分解转化以及土壤中许多物理、化学、生物学过程。所以调节土壤水分状况,常可使肥、气、热状况同时得到调节,了解边坡植被演替过程中土壤水分状况的变化规律,对边坡植被恢复具有重

要意义。由表 2 可知,扰动边坡植被恢复演替过程中,土壤含水量呈现先上升,后下降再上升的趋势。可能是由于不同的植被生长状况、覆盖度的变化、土壤表层水土流失程度致使在不同演替时期边坡土壤含水量在时空上的不同。

表 2 群落演替各阶段土壤水分和容重

编号	土壤含水量/%	土壤容重/(g·cm ⁻³)
SP ₁	12.51±1.01	1.92±0.02
SP ₂	23.22±1.13	1.89±0.01
SP ₃	28.31±1.54	1.66±0.05
SP ₄	31.44±1.32	1.64±0.01
SP ₅	27.23±1.17	1.58±0.04
SP ₆	16.71±0.89	1.59±0.06
SP ₇	20.33±1.02	1.62±0.07
SP ₈	33.42±1.28	1.35±0.02

土壤容重大小反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力的高低,也可作为土壤熟化程度指标之一。土壤容重越小,说明熟化程度较高,土壤结构、透

气透水性能越好土壤容重越小,说明熟化程度较高,土壤结构、透气透水性能越好。由表 2 可知,在边坡植被恢复过程中,土壤容重随着植被恢复演替呈逐渐下降趋势,不同的演替类型,其表层状况如枯落物的数量和构成以及植物根系的生长发育特征不同,造成了不同的治理类型土壤物理性状的差异。随着演替梯度的变化,各样地土壤特性呈现有规律的良性发展的趋势,即土壤容重逐渐减小,均表现出了对土壤容重明显的改良作用。

2.2 群落演替各阶段土壤化学性质变化

土壤 pH 值对土壤肥力性质有较大影响,土壤微生物的活动,土壤有机质的分解,土壤营养元素的释放与转化等过程都与土壤 pH 值有关。从表 3 中可以看出,SP₁ 到 SP₇ 阶段,为偏碱性范畴,整体变动幅度不大,各样地之间差异不显著,呈现波动平稳的趋势,SP₈ 阶段 pH 值为 7.40,属于中性范畴土壤,随着时间的演替,有机凋落物大量增加,分解产生的有机酸对土壤酸度产生影响。

表 3 群落演替各阶段土壤 pH 值和养分

编号	pH 值	有机质/(g·kg ⁻¹)	全氮/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	全钾/(g·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
SP ₁	8.23	5.21±0.26	0.49±0.01	19.34±0.31	0.61±0.01	15.21±1.34	3.61±0.02	19.21±1.12
SP ₂	8.24	11.34±0.58	0.52±0.01	24.63±1.11	1.61±0.02	23.46±1.78	5.42±0.03	38.45±1.42
SP ₃	8.21	7.68±0.47	0.50±0.01	40.87±2.23	1.53±0.02	30.57±1.21	5.81±0.02	62.26±2.41
SP ₄	8.41	10.81±0.52	0.81±0.02	49.21±1.29	1.78±0.02	25.72±2.01	5.47±0.02	63.78±2.97
SP ₅	8.19	20.63±1.24	1.50±0.02	70.43±3.65	0.62±0.01	14.21±1.01	7.28±0.05	105.53±5.31
SP ₆	8.18	19.42±1.01	1.29±0.01	61.56±2.87	0.54±0.01	15.91±0.89	5.01±0.02	121.32±4.41
SP ₇	8.20	18.24±0.98	1.43±0.02	98.81±4.42	0.86±0.02	16.42±0.74	5.68±0.04	81.48±1.27
SP ₈	7.40	45.02±2.31	2.42±0.02	124.41±7.52	0.54±0.02	20.57±1.24	5.02±0.02	63.29±2.11

土壤有机碳是土壤养分循环转化的核心^[15],植被恢复时间直接影响地表和地下生物量的积累,影响土壤有机物质的输入与输出。从表 3 可知,土壤有机碳随植被恢复时间的推移增加趋势十分明显,不同植被演替阶段土壤有机质有差异。从 SP₁ 到 SP₂ 阶段增加幅度较大,演替处于一年生草本向多年生草本的演替阶段,植被覆盖度及物种数增多,地表枯枝落叶层增加,土壤有机碳矿化加速,土壤有机碳增加幅度较大;SP₂ 到 SP₃ 阶段,随着大量新的植物物种的侵入,使得群落各种间发生新的生存竞争,物种多样性下降,有机碳出现下降趋势;SP₃ 到 SP₅ 阶段,有机碳含量重新呈现上升趋势;SP₅ 到 SP₆ 阶段,有机碳含量呈下降趋势,但变化趋势平缓,植被由灌草群落向乔木群落演替,物种数减少,地面覆盖度降,土壤有机质的积累较少,有机质呈下降趋势;SP₇ 到 SP₈ 阶段,

植被群落向乔灌草顶级群落演替,由于林地的郁闭度较高,且林间可形成灌草群落,有利于土壤养分的积累与转化,土壤有机质增加,土壤微生物活动加剧,有机碳增长趋势加剧。

土壤氮素是植物必需的营养元素,是土壤肥力的重要物质基础之一。土壤氮密度是土壤氮储量的一个重要指标,其高低反映了某一区域上土壤氮储量的大小^[16]。由表 3 可知,土壤全氮含量的变化趋势和土壤有机质变化趋势一致,不同演替阶段土壤全氮含量之间有差异。土壤碱解氮是土壤中有效态氮的主要形式,是土壤中有效氮的主要形式,表征土壤肥力质量的主要指标之一。植被自然恢复过程中,土壤碱解氮含量呈波动性上升趋势。地上植被覆盖度增加,其凋落物矿化后释放大量的铵态氮及硝态氮,且土壤全氮的增加也导致土壤碱解氮的增加。

土壤磷素是土壤肥力的重要组成因子,是植物生长不可缺少的大量营养元素,是一种沉积性的矿物。土壤速效磷是衡量土壤磷素有效供应的较好指标。扰动边坡植被恢复过程中,土壤速效磷含量的变化与有机质、全氮、碱解氮等的变化不同,植被恢复使土壤速效磷的增加非常有限。由表 3 可知,土壤全磷和速效磷含量随着恢复年限的增加,呈现先上升后下降最后趋于平稳的趋势。SP₁ 到 SP₃ 阶段,因为植被生长所需要的磷是由植物凋落物和土壤有机质分解提供,随着植被恢复的推进,地面覆盖物增加,加速了矿物质的分解和养分的积累,从而提高了速效磷含量;SP₃ 到 SP₅ 阶段,随着地面植被的繁殖、生长消耗了大量的速效 P,此阶段速效磷含量呈现明显下降趋势。随着植被恢复演替,扰动边坡土壤的全钾含量呈现波动性变化趋势,各阶段之间差异不显著,速效钾含量随着植被恢复的演替呈现先增加后降低的趋势。这是因为土壤中的钾是由植物凋落物和土壤有机质分解提

供,随着植被恢复的推进,地面覆盖物增加,加速了矿物质的分解和养分的积累,从而提高了速效钾含量。

2.3 群落演替各阶段土壤微生物量的变化

微生物量碳是植物营养的活性有效库,它的变化可以更灵敏地反映土壤耕作制度和土壤肥力的变化,研究微生物量碳对于了解土壤养分转化过程都具有重要的意义^[17]。由表 4 可见,微生物量碳随植被恢复演替呈波动性上升趋势,SP₁ 到 SP₃ 阶段,土壤微生物碳呈上升趋势,这是由于草本根系生物量及根系分泌物,促进了微生物生长;SP₃ 到 SP₅ 阶段,微生物量碳含量变化不大,各样地之间差异不显著;SP₅ 到 SP₈ 阶段,微生物碳含量呈上升趋势。

微生物量氮可作为反映土壤微生物同化—矿化活性的重要指标,对研究生态系统中氮的植物有效利用性有重要意义。在植被自然恢复过程中,土壤微生物量氮含量随着植被恢复年限的增加呈上升趋势(表 4)。

表 4 群落演替各阶段土壤微生物特性

编号	微生物量碳/ (mg · kg ⁻¹)	微生物量氮/ (mg · kg ⁻¹)	土壤呼吸/ (mg · kg · d ⁻¹)	呼吸熵/ (mg · g ⁻¹ · h ⁻¹)
SP ₁	90.42 ± 4.58	20.47 ± 1.08	18.53 ± 1.02	5.91 ± 0.42
SP ₂	141.21 ± 7.34	39.62 ± 2.86	24.27 ± 1.25	4.26 ± 0.31
SP ₃	214.57 ± 11.21	54.36 ± 2.98	42.81 ± 3.21	4.02 ± 0.22
SP ₄	196.92 ± 5.32	61.21 ± 2.12	44.64 ± 2.14	5.34 ± 0.14
SP ₅	188.32 ± 4.68	79.62 ± 4.81	65.21 ± 3.11	8.85 ± 0.28
SP ₆	316.41 ± 13.22	97.84 ± 3.46	67.58 ± 2.26	5.31 ± 0.17
SP ₇	501.34 ± 14.38	117.63 ± 6.12	86.19 ± 5.14	4.66 ± 0.29
SP ₈	689.71 ± 23.64	158.92 ± 5.72	88.38 ± 4.72	3.52 ± 0.12

土壤呼吸作用可用来反映土壤有机物的分解和土壤养分的转化程度,其主要是指土壤微生物呼吸作用。土壤呼吸速率随培养时间的变化反映了土壤有机质的矿化速率,可用来判断微生物活性大小。土壤微生物呼吸速率随着植被恢复年限的增加呈上升趋势,SP₁ 阶段土壤呼吸强度最低,SP₈ 阶段最高。自然恢复后,地面植被覆盖度增加,地表富集大量枯枝落叶层,有利于微生物的繁殖,土壤呼吸作用加强;随着植被的进一步演替,土壤微生物呼吸作用逐渐趋于稳定。

呼吸熵(qCO₂)又称代谢熵,是基础呼吸量与微生物量碳之间的比值,一直被认为是生态系统干扰和演化的指标,是衡量微生物对土壤碳利用效率的一个重要依据^[18]。在边坡植被恢复过程中土壤呼吸熵变化(表 4),SP₁ 到 SP₃ 阶段,土壤呼吸熵减小,土壤熟化程度较好;SP₃ 到 SP₅ 阶段,土壤呼吸熵增大,植被恢复期间,植被向乔灌木方向演替,土壤水分匮乏,植被覆盖度降低,微生物对土壤中碳的利用降低,土壤

呼吸熵呈上升趋势,这是微生物应对植被环境骤变的一种抗逆境反应;SP₅ 到 SP₈ 阶段,土壤呼吸熵减小,植被群落向乔灌草顶级群落演替,逐渐趋于稳定,土壤微生物活性升高,利用碳的效率变高。

3 结论

扰动边坡植被恢复过程中,土壤含水量呈上升趋势,土壤容重呈下降趋势,总的来说,随着植被恢复,土壤物理性质逐渐改良;土壤有机质、全氮、速效氮、微生物量碳、微生物量氮、土壤呼吸呈上升趋势。全磷和全钾变化趋于稳定,速效磷和速效钾随着植被恢复演替在前期呈现增加的趋势,后又降低最后趋于稳定。土壤微生物呼吸速率随着植被恢复年限的增加呈上升趋势。随着植被恢复向乔灌草顶级群落演替,逐渐趋于稳定,土壤微生物活性升高,利用碳的效率变高土壤呼吸熵减小。说明植被在恢复过程中,土壤的熟化程度越来越高。

[参 考 文 献]

- [1] Zak D R, Kling G W. Microbial community composition and function across an arctic tundra landscape [J]. *Ecology*, 2006, 87(7):1659-1670.
- [2] Bhojvaid P P, Timmer V R. Soil dynamics in an age sequences of prosopis juliflora planted for sodic soil restoration in India [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 106(2/3):181-193.
- [3] Joel M, Jennifer L. Shifting microbial community structure across a marine terrace grassland chronosequence, Santa Cruz, California [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, 42(1):21-31.
- [4] Joergensen R G, Wichern F. Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(12):2977-2991.
- [5] Lagomarsino A, Moscatelli M C, Di Tizio A, et al. Soil biochemical indicators as a tool to assess the short-term impact of agricultural management on changes in organic C in a Mediterranean environment [J]. *Ecological Indicators*, 2009, 9(3):518-527.
- [6] Mulder C. Driving force from soil invertebrates to ecosystem functioning: the allometric perspective [J]. *Naturwissenschaften*, 2006, 93(10):467-479.
- [7] Kibblewhite M G, Ritz K, Swift M J. Soil health in agricultural systems [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society (B): Biological Sciences*, 2008, 363(1492):685-701.
- [8] Zhao Zichao, Xia Zhenyano, Li Mingyi, et al. Soil Nutrient and soil enzyme activity of the slopes with different ecological protection Technologies [J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 356:2445-2450.
- [9] 夏长华, 方雪松. 北京建材化工厂采石场边坡生态修复施工实践 [J]. *地质灾害与环境*, 2008, 19(3):90-94.
- [10] 吴长文, 章梦涛. 裸露山体缺口生态治理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [11] 李少丽, 许文年, 丰贻, 等. 边坡生态修复中植物群落类型设计方法研究 [J]. *中国水土保持*, 2007(12):53-55.
- [12] 夏振尧, 周正军, 黄晓乐, 等. 植被护坡根系浅层固土与分形特征关系初步研究 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(S2):3641-3647.
- [13] 许文年, 夏振尧, 周宜红, 等. 植被混凝土力学特性研究方法探讨 [J]. *中国水土保持*, 2007(4):30-32.
- [14] 夏振尧, 许文年, 王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究 [J]. *岩土力学*, 2011, 36(2):1719-1724.
- [15] 李银科, 刘世增, 李发明, 等. 景电灌区几种土地利用方式土壤有机碳和养分特征研究 [J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(2):267-271.
- [16] 白军, 王庆改, 丁秋祎, 等. 不同芦苇沼泽湿地土壤全氮季节动态变化和氮储量研究 (简报) [J]. *草业学报*, 2008, 17(2):162-165.
- [17] Franzluebbers A J, Zuberer D A. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nit and nitrogen rogen in sorghum [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1995, 59(2):460-466.
- [18] Wardle D A, Ghani R L. A critique of the microbial metabolic quotient (qCO_2) as a bioindicator of disturbance and ecosystem development [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, 27(12):1601-1610.
- [19] 隧道建设, 2006, 26(3):5-8.
- [20] 郑颖人, 赵尚毅. 有限元强度折减法在土坡与岩坡中的应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 10, 23(19):3381-3388.
- [21] Zienkiewicz O C, Taylor, R L. *The Finite Element Method* [M]. New York: McGraw-Hill, 1989.
- [22] Zienkiewicz O C, Humpeson C, Lewis R W. Associated and nonassociated visco-plasticity in soil mechanics. *Geotechnique*, 1975, 25(4):671-689.
- [23] 吴海真, 顾冲时. 有限元强度折减法在土石坝边坡稳定分析中的应用 [J]. *水电能源科学*, 2006, 24(4):54-56.
- [24] 石长, 赵新铭. 用有限元强度折减法分析边坡稳定 [J]. *中国农村水利水电*, 2006(5):72-74.
- [25] 张彩双, 李俊杰, 胡军. 有限元强度折减法的边坡稳定分析 [J]. *中国农村水利水电*, 2006(5):72-74.
- [26] 王家臣. *边坡工程随机分析原理* [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1996.
- [27] 祝玉学. *边坡可靠性分析* [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993.
- [28] 龚晓南. *土塑性力学* [M]. 2 版. 杭州: 浙江大学出版社, 1999.
- [29] 戚筱俊. *工程地质及水文地质* [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1996.

(上接第 59 页)