

# 基于RS和GIS的水土流失敏感性评价及动态监测

王红岩<sup>1</sup>, 李强子<sup>1</sup>, 吴利桥<sup>2</sup>, 丁雷龙<sup>1,3</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 杜鑫<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

2. 珠江水资源保护科学研究所, 广州 510611; 3. 中国地质大学, 北京 100083)

**摘要:**以 Landsat-5 TM 影像为主要数据源, 结合高精度的土地利用数据和 DEM 高程, 基于遥感和 GIS 技术, 通过选取关键影响因子, 对红水河干流区 1990 年、2000 年和 2010 年的水土流失敏感性进行了评价及其时空动态监测分析。结果表明: 红水河干流区水土流失敏感性主要以轻度敏感和中度敏感为主, 1990—2010 年近 30 a 来水土流失敏感性总体呈现好转趋势; 在水土流失不同敏感性等级变化中, 以水土流失中度敏感转为轻度敏感面积最大, 1990—2000 年和 2000—2010 年转化面积分别为 2 736.24 km<sup>2</sup> 和 2 462.09 km<sup>2</sup>, 1990—2000 年水土流失敏感性向轻度敏感、不敏感转化的地区主要集中在红水河干流区中段区域, 但 2000—2010 年水土流失敏感性等级的变化区域与之明显不同, 主要发生在红水河干流区的东段。总体看来, 在响应国家水土流失治理措施下, 红水河干流区水土流失防治效果显著, 生态环境逐渐转好。

**关键词:** 水土流失; 敏感性评价; 动态监测; 遥感; GIS

**中图分类号:** S157

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1005-3409(2015)02-0064-05

## Dynamic Monitoring and Sensitivity Evaluation of Soil Erosion Based on RS and GIS

WANG Hongyan<sup>1</sup>, LI Qiangzi<sup>1</sup>, WU Liqiao<sup>2</sup>, DING Leilong<sup>1,3</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, DU Xin<sup>1</sup>

(1. Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Scientific Institute of Pearl River Water Resources Protection, Guangzhou 510611, China; 3. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

**Abstract:** With the support of remote sensing and GIS, the sensitivity of soil erosion in Red River district was studied based on the Landsat-5 TM image and combining with high-precision land use data and DEM. Based on these, the dynamic monitoring of soil erosion sensitivity in 1990—2010 was analyzed. The results showed that the soil erosion sensitivity in Red River district was mainly at mild and moderate degree, the sensitivity of soil erosion had become better from 1990 to 2010. The largest change area of the soil erosion sensitivity was from moderate level to mild degree, the transformed areas of 1990—2000 and 2000—2010 were 2 736.24 km<sup>2</sup> and 2 462.09 km<sup>2</sup>, respectively. The soil erosion sensitivity conversion which was the other erosion sensitivity converted to mild, and micro soil erosion sensitivity from 1990 to 2000 mainly concentrated in the middle of the Red River district, however, the change area from 2000 to 2010 was different from that from 1990—2000, which was mainly in the east of the Red River district. Overall, in response to the national soil erosion control measures, the performed water and soil conservation measures in Red River district were very effective and the eco-environment gradually improved.

**Keywords:** soil erosion; sensitivity evaluation; dynamic monitoring; RS; GIS

水土流失是当今全球面临的一个严峻的环境与灾害问题, 严重的水土流失已造成了生态环境的急剧恶化, 受到了越来越多的关注。水土流失导致土壤表层营养成分流失、生产力下降、土地退化、陆地生态环

境恶化等问题的发生, 另外农业用地的化肥农药残留随着水土流失进入河道水库, 是水环境恶化的主要污染源之一<sup>[1-3]</sup>。水土流失敏感性是指自然状态下发生土壤流失可能性的大小<sup>[4]</sup>, 开展水土流失敏感性评

收稿日期: 2014-04-28

修回日期: 2014-05-29

资助项目: 红水河综合利用规划环境影响后评价研究(1261320610403)

第一作者: 王红岩(1986—), 女, 山东省聊城市人, 博士, 助理研究员, 主要从事生态遥感、荒漠化遥感监测与评价研究。E-mail: wanghy@radi.ac.cn

通信作者: 吴利桥(1970—), 男, 湖北通城人, 高级工程师, 主要从事水资源保护、环境规划、环境影响评价工作。E-mail: wulq2004@126.com

价,有助于识别土壤侵蚀易形成的区域,评价土壤侵蚀对人类活动的敏感程度<sup>[5]</sup>,同时也为区域生态环境保护、生态安全维护、生态环境规划和管理提供科学依据<sup>[6]</sup>。近年来随着 3S 技术的发展,遥感技术在土地植被覆盖信息获取方面具有大面积、多时相、多波段、低成本的特色和信息丰富、动态性强的优势,GIS 技术具有强大的多要素相关空间分析的强大特点。鉴于此,国内外学者基于 3S 技术,在水土流失敏感性评价及土壤侵蚀潜在危险度评价等方面开展了大量研究工作<sup>[7-12]</sup>。但是在我国红水河流域的研究相对较少,同时对于区域水土流失敏感性动态变化研究较少。

红水河流域资源富庶,自然条件复杂多样,但生态环境很脆弱。红水河流域是西南地区水土流失的重灾区,生产条件恶劣,生存环境恶化,改善生态环境已经刻不容缓。在此背景下,本文基于遥感和 GIS 技术,选取关键影响因子,开展红水河流域水土流失敏感性评价,探讨了水土流失敏感区的空间分布格局,同时分析了 1990—2010 年水土流失敏感性动态变化,以期为红水河流域水土流失治理、有效控制该区域土壤侵蚀提出参考建议,为评价区域的水土保持规划制定和生态环境建设提供重要的科学依据和技术支撑。

1 研究区概况

红水河是珠江流域西江水系干流,上游系发源于云南沾益县的南盘江,在贵州省望谟县蔗香村与北盘江汇合后始称红水河,自西向东横穿广西中部,至象州县石龙镇三江口与柳江汇合后改称黔江。红水河干流全长 659 km,流域面积 3.3 万 km<sup>2</sup>。河流流经高原、低山和丘陵,其上游为三叠纪的砂页岩,中下游为石炭纪、二叠纪的石灰岩。红水河流域是典型的岩

溶地貌区,岩溶地貌面积占山地总面积的 65.1%。属亚热带季风气候区,年均气温为 16.9~21.0℃,年降水量达 1 244.0~1 590.7 mm。土壤类型主要包括赤红壤、红壤、黄壤、石灰土等。红水河流域矿产资源丰富,河川径流量大,河流落差大,蕴藏着丰富的水能资源。本文中研究区定义为红水河干流区,其涵盖干流区两侧第一道山脊线以内的范围,从大藤峡沿干流上朔至天生桥一级库尾段,包括了红水河上游 10 个梯级电站流域范围,总面积为 14 193 km<sup>2</sup>,跨越广西、贵州、云南三个省区。

2 数据及方法

2.1 遥感数据及其预处理

本文以 Landsat-5 TM 数据为基本遥感数据源,该数据的空间分辨率为 30 m,收集整理了覆盖红水河干流区的 1990 年,2000 年,2010 年三个时期的影像。获得红水河干流区数字高程模型 DEM 数据,其分辨率为 30 m。影像的预处理主要包括大气校正和几何校正两个方面。大气校正采用 ENVI/IDL 软件提供的 FLAASH 大气校正模块进行,其基本原理是改进的 MORTAN4+ 模型。几何校正参考 1:50 000 比例尺地形图,采用二次多项式进行校正,RMS 误差控制在一个像元之内。

2.2 水土流失敏感性评价指标

红水河干流区主要为水蚀分布区,水土流失主要受降雨侵蚀力、土壤可蚀性、土地利用类型、地形、植被覆盖度、水土保持措施等因子的影响<sup>[13-14]</sup>。由于降雨侵蚀力和土壤可蚀性变化不大,本文主要选取坡度、植被覆盖度和土地利用类型为水土流失敏感性评价及其动态变化分析的指标(表 1)。

表 1 水土流失敏感性评价因子及其分级

评价因子	土地利用	类型	覆盖度/%	坡度
不敏感	水田、水库/坑塘、	河流	>85	<8°
轻度敏感	针叶林、阔叶林、	灌木林	60~85	8°~15°
中度敏感	人工林、	草地	35~60	15°~25°
高度敏感	居住地、	旱地	15~35	25°~35°
极敏感	裸露地、	工矿区	<15	>35°

2.2.1 坡度因子提取 根据水土流失敏感性评价分级标准,将研究区坡度划分为<8°,8°~15°,15°~25°,25°~35°,>35°共 5 个级别。通过获取的红水河干流区 DEM 栅格数据,在 ArcGIS 中 Spatial Analysis 工具条下的 Surface Analysis 中的坡度工具(Slope)功能来生成以度为单位的坡度图,基于划分标准进行等级划分,获得红水河干流区坡度等级分布图。

2.2.2 植被覆盖度因子提取 归一化植被指数(NDVI)与植被覆盖度存在显著的正相关关系,本文

基于红水河干流区 TM 遥感影像,计算获得 NDVI 分布图,利用 Gutman 模型(见公式 1)提取植被覆盖度,基于水土流失划分标准进行了等级划分,获得研究区植被覆盖度等级分布图。

$$F_c = \frac{NDVI - NDVI_{soil}}{NDVI_{veg} - NDVI_{soil}}$$

(1)

式中:其中  $F_c$ ——植被覆盖度; $NDVI_{soil}$ ——完全是裸土或无植被区域的 NDVI 值; $NDVI_{veg}$ ——完全被植被覆盖的像元的 NDVI 值。

2.2.3 土地利用类型因子提取 基于获取的红水河干流区 1990 年,2000 年,2010 年三个时期的影像数据,主要采用面向对象的 SVM 自动识别算法进行研究区土地覆被信息提取<sup>[15-16]</sup>。通过空间数据层建立、分类划分体系、专题信息提取及专题信息后处理等四大流程获得高精度的红水河干流区土地利用类型分布图。根据红水河干流区土地利用类型特点,研究区土地利用类型划分为针叶林、阔叶林、灌木林、人工林、草地、水田、旱地、居住地、工矿地、河流、水库/坑塘和裸露地 12 类。

2.3 水土流失敏感性综合评价

根据红水河流域的实际情况及各个因子对水土流失影响的大小,参考前人研究结果,确定红水河干流区水土流失敏感性评价各因子的权重,其中,坡度因子权重 0.3,植被覆盖度权重为 0.4,土地利用类型权重为 0.3<sup>[17]</sup>。利用 ArcGIS 空间分析模块功能,采用多因子加权求和模型(见公式 2),将各评价因子与其相应的权重叠加分析和代数运算,再采用自然分界法(Natural break)将运算结果划分 5 级(表 2),得到红水河干流区 1990 年水土流失敏感性分级图,其中,自然分界法是利用统计学的 Jenk 最优化法得出的分界点,能够使各级的内部方差之和最小<sup>[18]</sup>。根据 1990 年研究区自然分界法的划分阈值,对 2000 年和 2010 年的各因子加权求和结果进行划分,得到研究区 2000,2010 年水土流失敏感性分级图。

$$S=\sum_{i=1}^nW_i\cdot A_i$$
 (2)

式中:S——水土流失敏感性综合评价结果;W<sub>i</sub>——第 i 个评价指标因子的权重;A<sub>i</sub>——第 i 个指标因子的数量化值;n——评价指标因子的个数(本文 n=3)。

表 2 水土流失敏感性综合评价分级

指标	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
S	<1.6	1.6~2.5	2.5~3.5	3.5~4.5	>4.5

3 结果与分析

3.1 红水河干流区水土流失敏感性空间分布

基于获取的红水河干流区的 TM 遥感数据及

DEM 数据,依据水土流失敏感性分级遥感评价方法,获得 1990 年,2000 年,2010 年红水河干流区水土流失敏感性等级分布图,再分别对研究区水土流失不同敏感性等级的面积进行统计分析,分析结果见表 3。从表 3 中可以看出,红水河干流区水土流失敏感性等级主要以轻度和中度为主,分别占了总面积的 92.66%,94.83%,93.61%。在 1990 年代,水土流失中度敏感区所占比重最大,但在 2000 和 2010 年代,水土流失轻度敏感区所占比重最大,表明 1990 年代水土流失发生可能性要比 2000 年代、2010 年代大。

从表 3 中可以看出,红水河干流区 1990 年,2000 年,和 2010 年三个年代水土流失敏感性空间分布存在较大变化。在红水河干流区西段区域主要是原始阔叶林、灌木林和高山草地,人为扰动相对较少,植被覆盖度较高,在 1990 年代,水土流失轻度敏感区分布最多,在 2000—2010 近二十年来,水土流失敏感性等级变化不大,主要以轻度和中度水土流失为主。红水河干流区中段区域 2000 年代和 1990 年代水土流失敏感性存在明显变化,主要由原来的中度敏感区向水土流失轻度敏感区的转化。红水河干流区东段区域 2010 年代和 2000 年代水土流失敏感性等级存在明显变化,主要由原来的水土流失中度敏感区向轻度敏感和不敏感的转化。这主要是因为国家对水土流失治理工作的重视,加强了水土流失的治理,以及红水河流域的开发利用与生态环境治理保护相结合的开发战略,在红水河中、下游大力发展针叶、针阔混交林,建立速生丰产用林,在下游平原发展混农林业等措施减小了水土流失发生的可能性。

从表 3 中可以看出,近三十年来红水河干流区水土流失敏感性有所好转,中度和高度敏感区面积减少,水土流失不敏感和轻度敏感区面积增加。其中 1990—2000 年代水土流失敏感性等级变化明显,中度敏感区面积减少了 1 388.12 km<sup>2</sup>,在 2000—2010 年代中度敏感区面积也有所减少,减少 575.57 km<sup>2</sup>。同时,高度敏感区面积也存在较大幅度的减少,说明红水河干流区生态环境逐渐好转,生态质量得到较明显的改善。

表 3 1990,2000,2010 年代红水河干流区水土流失敏感性类型面积统计

等级	1990 年		2000 年		2010 年	
	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	面积/km <sup>2</sup>	比例/%
不敏感	237.37	1.67	329.93	2.32	479.75	3.38
轻度敏感	5911.49	41.65	7605.98	53.59	8008.31	56.43
中度敏感	7240.55	51.01	5852.43	41.24	5276.86	37.18
高度敏感	791.83	5.58	402.10	2.83	423.47	2.98
极敏感	11.76	0.09	2.56	0.02	4.61	0.03

3.2 红水河干流区水土流失敏感性的动态监测

对水土流失敏感性分级图做了进一步统计分析,表 4 和表 5 分别为 1990—2000 年代和 2000—2010 年代不同水土流失敏感等级的转移矩阵。从表 4 中可以得出,1990—2000 年水土流失敏感性向轻度敏感、中度敏感和不敏感转化明显。1990—2000 年,有 2 736.24 km<sup>2</sup> 的水土流失中度敏感区转为轻度敏感,有 276.74 km<sup>2</sup> 的水土流失轻度敏感区转为不敏感,并且主要分布在红水河干流区的中段以及东部的大藤峡水电站区段,这些区域加强了水土流失治理工作,石山荒山绿化,加大了植树造林的面积,控制了水土流失,改善了生态环境。同时 2000 年代的水土流失高度敏感区的增加主要是中度敏感区的转移,增加的面积达 247.40 km<sup>2</sup>,主要分布在红水河干流区西

段区域,说明这些区域植被大面积遭破坏,植被覆盖率下降,水土流失发生可能性大大增加。

从表 5 中可以得出,2000—2010 年水土流失敏感性等级变化主要还是向轻度、不敏感和中度的转化,与 1990—2000 年变化一致,但变化分布区域有所不同。2000—2010 年水土流失敏感性等级变化中转为不敏感和轻度敏感区域主要分布在红水河干流区东段。其中:408.95 km<sup>2</sup> 的水土流失轻度敏感区转化为不敏感,但同时有 256.17 km<sup>2</sup> 不敏感区转为水土流失轻度敏感区;有 2 462.09 km<sup>2</sup> 的中度敏感区转变为轻度敏感,同时水土流失高度敏感区中有 60.42 km<sup>2</sup> 转为轻度敏感,有 262.22 km<sup>2</sup> 转为水土流失中度敏感区。总体来说,2000—2010 年红水河干流区水土流失得到控制,水土流失敏感性有所减轻,生态环境逐渐变好。

表 4 红水河干流区 1990—2000 年水土流失敏感性等级转移矩阵 km<sup>2</sup>

敏感性等级	2000 年				
	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
1990 年	不敏感	46.56	189.42	1.43	0
	轻度敏感	276.74	4516.01	1092.59	25.60
	中度敏感	6.51	2736.24	4250.22	247.40
	高度敏感	0.01	163.95	499.74	126.68
	极敏感	0	0.04	8.92	2.37

表 5 红水河干流区 2000—2010 年水土流失敏感性等级转移矩阵 km<sup>2</sup>

敏感性等级	2010 年				
	不敏感	轻度敏感	中度敏感	高度敏感	极敏感
2000 年	不敏感	66.47	256.17	7.14	0.15
	轻度敏感	408.95	5229.61	1876.70	90.43
	中度敏感	4.32	2462.09	3129.64	253.30
	高度敏感	0	60.42	262.22	78.44
	极敏感	0	0.01	1.15	1.16

4 结论与讨论

本文基于遥感和 GIS 技术,分析了红水河干流区 1990—2010 年近 30 a 的水土流失敏感性分布及其时空动态变化,研究结果为掌握该区域水土流失发生可能性及治理措施的实施提供一定的参考价值。研究表明:

- 1) 通过对红水河干流区 1990 年,2000 年,2010 年水土流失不同敏感性等级面积统计分析发现,红水河干流区水土流失敏感性主要以轻度和中度为主,分别占了总面积的 92.66%,94.83%,93.61%。
- 2) 通过水土流失不同敏感性等级面积转移矩阵分析得出,1990—2010 年来,红水河干流区水土流失敏感性向轻度、中度和不敏感转化明显,水土流失持续好转。式中:水土流失中度敏感区转为轻度敏感面

积最大,1990—2000 年和 2000—2010 年转化面积分别为 2 736.24 km<sup>2</sup> 和 2 462.09 km<sup>2</sup>。但 1990—2000 年和 2000—2010 年水土流失敏感性向轻度敏感、不敏感转化的地区分布不同,在 1990—2000 年,变化主要集中在红水河干流区中段区域,而 2000—2010 年水土流失的转化主要发生在红水河干流区的东段。

- 3) 虽然近 30 a 来红水河干流区水土流失敏感性有所改善,但在有些区域水土流失中度敏感转为高度敏感,对于这些区域需要加大水土流失治理力度,采取植树造林等措施进一步有效的遏制研究区的水土流失发生的可能性。
- 4) 水土流失的影响因子是多方面的,本研究从地形坡度、植被覆盖度及土地利用类型等 3 个因子考虑,参考前人研究结果定义了水土流失敏感性评价中三个因子的权重,研究结果有一定的片面性。在今后

的研究中,将从自然演化和人为干预两个方面,选取较为全面的影响因子进行评价,探索红水河干流区水土流失敏感性影响因子的权重计算与评价方法。

#### 参考文献:

- [1] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 91-97.
  - [2] 葛德祥, 庞治国, 王义成, 等. 二滩库区蓄水前后水土流失变化遥感监测与分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(1): 44-51.
  - [3] 贺缠生, 傅伯杰, 陈利顶. 非点源污染的管理及控制[J]. 环境科学, 1998, 19(5): 87-91.
  - [4] 胡良军, 李锐, 杨勤科. 基于 GIS 的区域水土流失评价研究[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 167-175.
  - [5] 陈建军, 张树文, 李洪星, 等. 吉林省土壤侵蚀敏感性评价[J]. 水土保持通报, 2005, 25(3): 49-53.
  - [6] 张玉娟, 刘丹丹, 王延亮. 基于 RS 和 GIS 东北农业主产区水土流失敏感性评价: 以黑龙江省宾县为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2013, 36(8): 37-39.
  - [7] 张朝琼, 郜红娟, 张帮云. 基于 GIS 的仁怀市生态敏感性评价[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 179-182.
  - [8] 张伟, 王家卓, 任希岩, 等. 基于 GIS 的山地城市生态敏感性分析研究[J]. 水土保持研究, 2013, 20(3): 44-47.
  - [9] 朱志玲, 吴咏梅, 张敏. 基于 GIS 的宁夏生态环境敏感性综合评价[J]. 水土保持研究, 2012, 19(4): 101-105.
  - [10] 魏兴萍. 基于 RS 和 GIS 的重庆南川区水土流失变化研究[J]. 水土保持研究, 2009, 16(5): 60-65.
  - [11] 李婷, 于青秀, 张世熔. 基于 RS 和 GIS 的涪江流域上游地区土壤侵蚀定量估算[J]. 四川农业大学学报, 2011, 29(1): 84-88.
  - [12] 周璟, 张旭东, 何丹, 等. 基于 GIS 与 RUSLE 的武陵山区小流域土壤侵蚀评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(4): 468-474.
  - [13] 崔保山, 杨志峰. 湿地生态系统健康评价指标体系 II. 方法与案例[J]. 生态学报, 2002, 22(8): 1231-1239.
  - [14] 吴建国, 常学向. 荒漠生态系统健康评价的探索[J]. 中国沙漠, 2005, 25(4): 604-611.
  - [15] Zhang L, Huang X. Object-oriented subspace analysis for airborne hyperspectral remote sensing imagery [J]. Neurocomputing, 2010, 73(4): 927-936.
  - [16] Wu B, Xiong Z, Chen Y, et al. Classification of quick-bird image with maximal mutual information feature selection and support vector machine [J]. Procedia Earth and Planetary Science, 2009, 1(1): 1165-1172.
  - [17] 闫利会, 周忠发, 王媛媛. 丹霞地区水土流失遥感评价及空间分异: 以贵州省赤水市为例[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(20): 4491-4495.
  - [18] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.
- ~~~~~
- (上接第 63 页)
- [6] 陈孙华. 衡阳紫色土丘陵坡地不同恢复阶段土壤理化特征[J]. 水土保持研究, 2013, 20(1): 57-60.
  - [7] 龙健, 黄昌勇, 滕应, 等. 矿区重金属污染对土壤环境质量微生物学指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1): 60-63.
  - [8] 龙健, 李娟, 滕应, 等. 贵州高原喀斯特环境退化过程土壤质量的生物学特性研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 47-50.
  - [9] 李凤霞, 王学琴, 郭永忠, 等. 不同改良措施对银川平原盐碱地土壤性质及酶活性的影响[J]. 水土保持研究, 2012, 19(6): 13-18.
  - [10] 任晓旭, 蔡体久, 王笑峰. 不同植被恢复模式对矿区废弃地土壤养分的影响[J]. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 151-154.
  - [11] 李跃林, 李志辉, 彭少麟, 等. 典型相关分析在桉树人工林地土壤酶活性与营养元素关系研究中的应用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(5): 544-549.
  - [12] 蒋云贵, 杨永前. 四川引种台湾桉木立地条件与木材力学性质的典型相关分析[J]. 四川林业科技, 2012, 33(3): 84-87.
  - [13] 岳中辉, 王百慧, 张兴义, 等. 农田黑土酶活性与养分的典型相关分析[J]. 中国农学通报, 2012, 28(24): 68-73.
  - [14] 宋娟丽. 黄土高原草地土壤质量特征及评价研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
  - [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
  - [16] 姚槐应, 黄昌勇. 土壤微生物生态学及其试验技术[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
  - [17] Weaver R W, Augle S, Bottomly P J, et al. Methods of soil analysis. Part2. Microbiological and biochemical properties. No. 5 [M] // Tabatabai M A. Enzymes. Madison: Soil Science Society of America, 1994: 775-833.
  - [18] Eivazi F, Tabatabai M A. Glucosidases and galactosidases in soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1988, 20(5): 601-606.