

# 基于马尔柯夫模型的漾濞江流域土地利用变化预测

王 剑, 徐 美

(沧州师范学院, 河北 沧州 061001)

**摘 要:**为了掌握漾濞江流域土地利用的演变趋势,优化土地利用结构,实现土地的可持续利用,在遥感和地理信息系统技术的支持下,利用 1990 年和 2001 年的遥感影像作为信息源,获取漾濞江流域土地利用类型数据,结合马尔柯夫模型确定相应的转移概率矩阵,据此分析土地利用各类型间的相互转化情况,并应用马尔柯夫模型和单一土地利用动态度对土地利用的演变趋势进行分析。结果表明:土地利用类型之间的相互转化突出表现为耕地、林地、草地之间的相互转化以及耕地向城乡工矿居民用地的转化;林地面积将趋于稳定,仍为研究区的主要土地利用类型,耕地、草地面积继续减少,水域、城乡工矿居民用地面积稳步增加;必须采取有效措施,解决好耕地保护和城乡发展之间的矛盾,实现当地的可持续发展。

**关键词:**马尔柯夫模型;土地利用;漾濞江流域;遥感;地理信息系统

中图分类号:F301.24

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2011)05-0091-05

## Prediction of Land Use Change in Yangbiji River Basin Based on the Markov Model

WANG Jian, XU Mei

(Cangzhou Normal University, Cangzhou, Hebei 061001, China)

**Abstract:** In order to grasp the land use evolution tendency in Yangbiji river basin, optimize the land use structure and realize sustainable land use, the remote sensing images in 1990 and 2001 were utilized and the data of land use change were acquired with the help of RS and GIS. By means of Markov model, the corresponding transition probability matrix was confirmed. Then, the mutual transformation and the evolution tendency of the land use were analyzed by the Markov model and the single land use dynamic index. The results showed that the conversion among farmland, woodland and grassland was the most crucial one in various land use form conversions, followed by the conversion of farmland to residential-industrial quarter; the general trend of land use change in Yangbiji river basin was: the area of woodland would gradually became stable and was still the main land use type, the areas of farmland and grassland were reducing, the areas of water and residential-industrial quarter were increasing steadily; the contradiction between the farmland conservation and the development of city was becoming more and more serious and effective measures should be taken to protect the farmland and promote local sustainable development.

**Key words:** Markov model; land use; Yangbiji river basin; RS; GIS

土地利用是具有特定时间和空间属性的一种特殊的自然和社会现象,其形态和状态可在多种时空尺度上变化<sup>[1]</sup>。近几十年来,随着人口的急剧增加和科学技术水平的提高,土地利用类型发生了巨大的变化,并由此产生了一系列环境变化问题,准确、合理地预测土地利用动态演变趋势,可为制定长期、可持续发展的土地管理和土地规划提供数据。

土地利用变化趋势的预测方法很多,常用的有线

性回归模型预测法、灰色预测模型预测法、马尔柯夫模型预测法、系统动力学预测法以及规划预测法等<sup>[2-3]</sup>。其中,马尔柯夫模型是资源与环境动态变化研究中应用较多的数学模型之一,已应用于国内外的植被演替预测、土壤侵蚀演变预测以及土地利用变化预测之中<sup>[4-7]</sup>。漾濞江流域属于澜沧江水系,周庆等<sup>[8]</sup>在 RS 和 GIS 技术的支持下,分析了澜沧江漫湾水电站库区土地利用类型的总体结构变化、空间转移

情况、单一土地利用类型以及综合土地利用的空间动态特征;王娟等<sup>[9]</sup>定量分析了云南澜沧江流域土地利用变化以及各种土地利用方式的相互转化关系,在土地利用变化的基础上,以景观干扰指数和土地利用类型的敏感度指数为评价指标,分析了不同研究时段内不同空间范围的景观生态风险变化情况。针对该流域采用马尔柯夫模型对土地利用变化进行大范围预测的研究案例较少,因此,以遥感影像作为数据源,对漾濞江流域的土地利用变化进行动态监测,通过 GIS 技术和马尔柯夫模型预测土地利用动态变化趋势,以期为保护和合理利用土地资源提供科学依据,制定相关规划、决策提供服务,将具有重要的现实意义。

## 1 研究区概况

漾濞江流域主要包括漾濞县、洱源县、剑川县三县部分地区,流域面积达 4 353 km<sup>2</sup>,主要有漾濞江、剑湖、弥沙河等水域。由于地处低纬高原,在低纬度高海拔地理条件综合影响下,形成了低纬高原季风气候,具有四季温差小、干湿季分明、光照充足、垂直差异显著的气候特点,植被和土壤的垂直分带比较明显,植被类型主要包括常绿阔叶林、落叶阔叶林、云南松林、华山松林等,土壤主要以棕壤、红壤、紫色土等为主。近年来,社会经济得到较快发展,以漾濞县为例,设 3 镇 6 乡 65 个村委会和 1 个社区,有彝、汉、白、回等 17 个民族。2005 年,全县总人口 100 663 人,生产总值 44 886 万元,人均 GDP 为 4 466 元,交通、国土、水利、林业和农业等基础产业设施明显改善,全县形成了粮、烟、林、畜、果、鱼、菜等多行业并举发展的格局,随着国家相关政策的实施,土地利用状况发生了不同程度的变化。

## 2 研究方法

### 2.1 数据来源与处理

本研究所使用的数据主要包括研究区 1990 年的 TM 影像、2001 年的 ETM 影像、1:5 万 DEM 图、1:10 万地形图、部分县的土地利用现状图和土地利用调查所获得的 GPS 数据所对应的土地利用类型。

本研究参考《土地利用现状调查技术规程》和大理州土地利用现状分类系统,同时考虑到影像的可解译性,将研究区土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地和裸岩石砾地 6 种类型。以遥感影像处理软件(ERDAS IMAGINE)为处理平台,对遥感影像进行几何校正、地理坐标转换、镶嵌、

融合、增强、裁剪等预处理后,采用多步骤分类法,解译遥感影像,提取土地利用信息,其基本思路是:先分析各地物的光谱特征,采用阈值法和比值法将遥感影像分为水体和阴影、植被覆盖、非植被覆盖三个图层,然后采用监督分类方法,解译以上三个图层,最后将三个图层的解译结果合并。

为了保证分类的准确性,必须对分类结果进行精度评价,精度评价主要参考 GPS 样本点和部分县土地利用图,计算土地利用分类混淆矩阵和 Kappa 指数,经计算 1990 年和 2001 年 Kappa 指数分别为 0.75,0.73,均达到最低允许判别精度 0.7 的要求<sup>[10]</sup>,进而生成研究区 1990 年和 2001 年 1:10 万土地利用现状图,作为计算土地利用转移概率矩阵的基础图件。

### 2.2 马尔柯夫模型

马尔柯夫过程是人们研究最多、应用又较广的离散随机过程,因其最先由 A. A. Markov 于 1906 年研究得出,故称为马尔柯夫模型<sup>[11]</sup>。马尔柯夫模型预测法<sup>[12]</sup>是利用马尔柯夫过程的“无后效性”,即某随机过程第  $(n+1)$  步的状态  $X(n+1)$  的条件概率与  $X(0), X(1), X(2), \dots, X(n-1)$  等  $n$  步以前的状态无关,而仅与  $X(n)$  状态有关的性质,来对事物的动态演变进行预测的方法。由于在一定区域内不同土地利用类型之间具有相互可转化性,而且其相互转化过程包含着许多尚难用函数关系准确描述的事件,因此用马尔柯夫模型对土地利用变化进行预测是可行的。

运用马尔柯夫模型进行土地利用变化趋势预测,关键在于确定土地利用类型之间相互转化的初始转移概率矩阵  $P$ ,其数学表达式一般为<sup>[13]</sup>

$$P_{ij} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & \cdots & P_{2n} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & \cdots & P_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ P_{n1} & P_{n2} & P_{n3} & \cdots & P_{nm} \end{bmatrix}$$

式中: $n$ ——研究区域的土地利用类型的数目;  
 $P_{ij}$ ——土地利用类型  $i$  转化为类型  $j$  的转移概率,  
 $P_{ij}$  具有如下特点:(1)  $0 \leq P_{ij} \leq 1$ ,即各元素非负;  
(2)  $\sum_{j=1}^n P_{ij} = 1$ ,即每行元素之和为 1。

初始转移概率矩阵的求解过程可根据地图代数原理,对 1990 年和 2001 年两期土地利用类型图  $A_k$  和  $A_{k+1}$ ,采用地图代数方法  $C_{ij} = A_{ij}^k \times 10 + A_{ij}^{k+1}$  (土地利用类型  $< 10$  时适用),生成研究区 1990—2001 年的土地利用类型转化分布图,据此进一步得到反映

土地利用类型相互转化定量关系的转移矩阵,再导出初始转移概率矩阵<sup>[14-15]</sup>。

根据马尔柯夫性质和条件概率的定义,运用马尔柯夫链基本方程<sup>[16]</sup>,可以预测出各土地利用类型所占比例的动态变化情况。

3 结果与分析

3.1 土地利用类型转化分析

马尔柯夫转移矩阵能够定量说明不同土地利用类型之间的转化情况,从表 1 可知,耕地主要流向林地、草地和城乡工矿居民用地,以林地最多,有 13 893.30 hm<sup>2</sup> 的耕地转为林地,占到耕地面积的 23.04%,只有很少一部分转化为了水域,同时有较大面积的林地和草地转化为耕地,以林地转化面积最大,达到 12 735.19 hm<sup>2</sup>,

占耕地面积的 21.12%;林地只有 8.60%的面积发生了转移,主要流向草地和耕地,分别占到 4.62%和 3.95%,而林地的补充也主要来源于草地和耕地,以草地最多,为 16 588.94 hm<sup>2</sup>,占林地总面积的 5.15%;草地有较大幅度的变化,转化比例为 45.05%,主要转化为林地和耕地,以林地最多,占草地总面积的 37.11%,只有很少一部分转化为水域,尽管有一定面积的林地和耕地转变为了草地,但其面积均小于草地变为林地和耕地的面积;水域面积尽管表现为一定程度的净增加,但其动态变化不明显,主要是水域和耕地间的相互转化;城乡工矿居民用地有较大幅度的增加,主要表现为耕地的转化,占到耕地面积的 1.92%,只有很小面积的林地、草地、水域转变为城乡工矿居民用地。

表 1 1990—2001 年研究区土地利用初始转移矩阵

土地利用类型		耕地	林地	草地	水域	城乡工矿居民用地	裸岩石砾地
耕地	面积/hm <sup>2</sup>	39153.02	13893.30	5673.49	423.36	1157.47	0.00
	比例/%	64.93	23.04	9.41	0.70	1.92	0.00
林地	面积/hm <sup>2</sup>	12735.19	294320.01	14890.73	0.00	64.62	0.00
	比例/%	3.95	91.40	4.62	0.00	0.02	0.00
草地	面积/hm <sup>2</sup>	7901.93	16588.94	20093.32	68.76	45.59	0.00
	比例/%	17.68	37.11	44.95	0.15	0.10	0.00
水域	面积/hm <sup>2</sup>	238.42	0.00	26.83	4224.58	22.87	0.00
	比例/%	5.28	0.00	0.59	93.62	0.51	0.00
城乡工矿居民用地	面积/hm <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	2973.50	0.00
	比例/%	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00
裸岩石砾地	面积/hm <sup>2</sup>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	792.47
	比例/%	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00

注:在表中,行表示  $k$  时期的  $i$  种土地利用类型,列表示  $k+t$  时期的  $j$  种土地利用类型,行列交叉表示  $k$  时期的土地利用类型转变为  $k+t$  时期各种类型的面积和所占比例。

3.2 马尔柯夫预测过程及检验

根据研究区 2001 年各类土地利用类型面积所占比例求得初始状态矩阵,而初始转移概率矩阵可由表 1 得到。运用马尔柯夫链的基本方程,通过 MAT-

LAB 计算软件,预测出研究区相同时间间隔土地利用情况,即每经过 11 a 即为 1 步,当  $n=1$  时,预测年份为 2012 年; $n=2$  时,预测年份为 2023 年,以此类推,预测结果如表 2 所示。

表 2 1990—2023 年研究区土地利用情况土地利用面积及所占比例比较

类型	1990 年		2001 年		2012 年		2023 年		1990—2001 年		2001—2012 年		2012—2023 年	
	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %	面积/ hm <sup>2</sup>	比例/ %
A	60300.65	13.85	60028.57	13.79	59260.16	13.61	58511.56	13.44	-272.08	-0.04	-768.41	-0.12	-748.6	-0.11
B	322010.54	73.98	324802.26	74.62	325835.14	74.85	325952.54	74.88	2791.72	0.08	1032.88	0.03	117.4	0.00
C	44698.55	10.27	40684.36	9.35	38975.72	8.95	38178.36	8.77	-4014.19	-0.82	-1708.64	-0.38	-797.36	-0.19
D	4512.71	1.04	4716.70	1.08	4883.94	1.12	5045.65	1.16	203.99	0.41	167.24	0.32	161.71	0.30
E	2973.50	0.68	4264.05	0.98	5549.93	1.27	6816.79	1.57	1290.55	3.95	1285.88	2.74	1266.86	2.08
F	792.47	0.18	792.47	0.18	792.47	0.18	792.47	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注:A、B、C、D、E、F 分别代表耕地、林地、草地、水域、城乡工矿居民用地、裸岩石砾地。

为了检验预测结果的合理性,从定量的角度看,以 1990 年土地利用类型数据为基数,采用上述的土

地利用转移矩阵,用同样的方法模拟出 2001 年研究区的土地利用情况,同研究区 2001 年土地利用的实

际情况相比较,如表 3 所示,总的来看,两者的差值都比较小;从定性的角度看,考虑到资料的可获性,以漾濞县为例,依据《漾濞彝族自治县土地利用总体规划(2006—2020 年)》,漾濞县林地、建设用地所占比例将

表 3 马尔柯夫预测土地利用情况的检验(2001 年)

项 目	耕地	林地	草地	水域	城乡工矿 居民用地	裸岩石 砾地
实际比例/%	13.7905	74.6177	9.3465	1.0836	0.9796	0.1821
预测比例/%	13.7906	74.6174	9.3466	1.0838	0.9795	0.1821
比例差值/%	-0.0001	0.0003	-0.0001	-0.0002	0.0001	0.0000

### 3.3 土地利用类型变化预测分析

为进一步分析预测时段内土地利用的变化趋势,计算各时段的单一土地利用动态度<sup>[17]</sup>,结合预测值和计算结果,从表 2 可知,研究区土地利用变化趋势具有如下特点:(1)耕地面积所占比例持续降低,从 1990 年的 13.85%降低到 2023 年的 13.44%。其中,2001—2012 年减少 768.41 hm<sup>2</sup>,2012—2023 年减少 748.6 hm<sup>2</sup>,因此,必须严格执行基本农田保护制度和耕地补偿制度,控制非农建设占用耕地,从而保证耕地总量的稳定;(2)林地是整个研究区主要的土地利用类型,其比例在 74%左右,整个预测时段林地面积尽管呈现一定程度的增加,但各时期净增加面积越来越小,2001—2012 年增加 1 032.88 hm<sup>2</sup>,而 2012—2023 年只增加了 117.4 hm<sup>2</sup>,增加比例越来越小,这同整个研究区的地形条件、本身林地覆盖度较大、退耕还林政策的有效引导有关,以漾濞县为例,被“三山七河环抱”,林地中有林地面积占到全县林地面积的 84.60%,植被覆盖度高,森林覆盖率达到 60.47%;(3)草地面积大幅减少,但减少的幅度在降低,2001—2012 年减少 1 708.64 hm<sup>2</sup>,2012—2023 年减少 797.36 hm<sup>2</sup>,2012 年和 2023 年分别占到 8.95%,8.77%;(4)水域面积稳步增加,2001—2012 年、2012—2023 年分别增加 167.24,161.71 hm<sup>2</sup>;(5)城乡工矿居民用地面积大幅增加,2001—2012 年、2012—2023 年分别增加 1 285.88,1 266.86 hm<sup>2</sup>,这同当地经济的发展、人口的增长和城市化进程的加快有关,必须充分利用低效、闲置的建设用地,严格控制建设占用耕地规模。

从各时期单一土地利用动态度看:城乡工矿居民用地变化速度最快,2001—2012 年、2012—2023 年其动态度指数分别为 2.74%,2.08%;其次为水域、草地和耕地,2012—2023 年其动态度指数分别为 0.3%,−0.19%,−0.11%,最小的为林地和裸岩石砾地,2012—2023 年林地的动态度指数趋向于 0。

比较各时期的动态度指数,可以发现:耕地动态度指数从 −0.04%增加到 −0.12%,而后又变为

会增加,耕地所占比例将会减少,这同表 2 预测的变化趋势一致,综合分析,说明研究区在经济发展较为平稳,土地利用政策不发生重大变化时,采用该转移概率矩阵通过马尔柯夫模型预测土地利用变化是可行的。

−0.11%;林地变化将趋于稳定,面积逐渐趋于饱和;草地动态度指数变化幅度明显,其变化趋势将会越来越小;水域和城乡工矿居民用地面积稳步增加。

## 4 结 论

(1)马尔柯夫转移矩阵分析表明:研究区不同土地利用类型之间的相互转化突出表现为耕地、林地、草地之间的相互转化以及耕地向城乡工矿居民用地的转化。

(2)马尔柯夫模型的预测结果表明:研究区林地面积将逐渐趋于稳定,成为研究区的主要土地利用类型,耕地、草地面积继续减少,水域面积稳步增加,随着人口的增加和城市化进程的加快,有大量的耕地被占用,变为城乡工矿居民用地,这对当地可持续发展不利。

(3)随着社会经济的发展,今后一段时间研究区土地利用的主要问题是解决好耕地保护和城乡发展之间的矛盾。因此,在发展经济的同时,必须采取有效的措施,合理利用土地资源,加大对耕地的保护力度,提高单位土地产量,实现土地的集约利用,同时要适当控制建设用地的激增现象,保护当地的生态环境,实现当地的可持续发展。

## 5 讨 论

本研究采用马尔柯夫模型预测了研究区土地利用的演变趋势,其预测结果对研究区生态环境的保护和土地资源的合理利用具有一定参考价值,但也存在一定的不足,有待进一步研究。

(1)由于受到遥感信息源时相、分辨率和来源的影响,仅采用了两期遥感影像,未考虑裸岩石砾地的转化情况,这不符合实际情况,必然会对预测的精确性造成影响,下一步研究中要尽可能增加不同来源和不同分辨率的遥感影像,提高遥感影像的解译精度。

(2)土地利用变化是一个复杂的过程,不仅受到自然因素的影响,而且会受到社会经济发展、土地利

用政策、法规等因素影响,而马尔柯夫模型是由过去土地利用类型的转移概率来模拟分析未来变化的趋势,其预测精度会有一定的局限性。在今后的研究中,可结合其他预测方法进行比较印证,使预测精度更加准确和科学。

#### 参考文献:

- [1] 孙希华. 济南泉域土地利用动态变化及驱动力研究[J]. 国土资源遥感, 2004(1): 60-64.
- [2] 赵小汎, 沈润平. 空间分析在土地利用/土地覆被变化机制研究中的应用[J]. 江西农业大学学报, 2004, 26(2): 304-308.
- [3] 王秀兰, 包玉海. 土地利用动态变化研究方法探讨[J]. 地理科学进展, 1999, 18(1): 81-87.
- [4] 杨子生, 贺一梅, 李云辉, 等. 近40年来金沙江南岸干热河谷区的土地利用变化及其土壤侵蚀治理研究: 以云南宾川县为例[J]. 地理科学进展, 2004, 23(2): 16-26.
- [5] 全斌, 朱鹤健, 晏路明, 等. 厦门岛土地利用变化趋势预测[J]. 资源科学, 2004, 26(6): 98-104.
- [6] 熊云波, 吴玉鸣. GIS支持下土地利用空间演变过程的马尔可夫模拟研究: 以上海市中心城区为例[J]. 南阳师范学院学报: 自然科学版, 2002, 1(6): 87-92.
- [7] 王鹏, 曹学章, 董杰. 三峡库区土地利用变化的特征与趋势[J]. 资源开发与市场, 2004, 20(6): 433-435.
- [8] 周庆, 欧晓昆, 张志明, 等. 澜沧江漫湾水电站库区土地利用格局的时空动态特征[J]. 山地学报, 2008, 26(4): 481-489.
- [9] 王娟, 崔保山, 刘杰, 等. 云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(2): 269-277.
- [10] 解修平, 周杰. 地利用变化预测研究: 以西安地区为例[J]. 干旱区研究, 2008, 25(1): 125-130.
- [11] 杨子生, 李云辉, 邹忠, 等. 中国西部大开发云南省土地资源开发利用规划研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2003.
- [12] 陈龙泉, 郑海金. 基于 Markov-CA 的土地利用/土地覆盖变化动态模型研究[J]. 测绘信息与工程, 2004, 29(1): 36-38.
- [13] 李忠锋, 王一谋, 冯毓荪, 等. 基于 RS 与 GIS 的榆林地区土地利用变化分析[J]. 水土保持学报, 2003, 17(2): 97-99.
- [14] 何春阳, 史培军, 陈晋, 等. 北京地区土地利用/覆盖变化研究[J]. 地理研究, 2001, 20(6): 679-687.
- [15] 蒙古军, 吴秀芹, 李正国. 河西走廊土地利用/覆盖变化的景观生态效应: 以肃州绿洲为例[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2535-2541.
- [16] 赵庚星, 李强, 李玉环, 等. GIS 支持下的马尔柯夫链模型模拟垦利县土地利用空间格局变化[J]. 地理科学进展, 1999, 30(4): 345-349.
- [17] 宋轩, 石端晓, 张学雷, 等. 基于元胞自动机的郑州市区土地利用变化研究[J]. 河南科学, 2008, 26(8): 971-976.

(上接第90页)

- [4] Beymer R J, Klopatek J M. Effects of grazing on cryptogamic crusts in pinyon-juniper woodlands in Grand Canyon National Park[J]. Am. Midl. Naturalist, 1992, 127: 139-148.
- [5] Eldridge D J, Tozer M E, Slangen S. Soil hydrology is independent of microbiotic crust cover: further evidence from a wooded semiarid Australia rangeland[J]. Arid Soil Res Rehabil., 1997, 11: 113-126.
- [6] McKenna-Neuman C, Maxwell C D, Boulton J W. Wind transport of sand surfaces crusted with photoautotrophic microorganisms[J]. Catena, 1996, 27: 229-247.
- [7] St. Clair L L, Webb B L, Johansen J R, et al. Cryptogamic soil crusts: Enhancement of seedling establishment in disturbed and undisturbed areas[J]. Reclamation Revegetation Res., 1984, 3: 129-136.
- [8] Harper K T, Pendleton R L. Cyanobacteria and Cyanolichens: Can they enhance availability of essential minerals for higher plants[J]. Great Basin Nat., 1993, 53: 59-72.
- [9] McIlvanie S K. Grass seedling establishment and productivity-overgrazed vs. protected range soils[J]. Ecology, 1942, 23: 228-231.
- [10] Sylla D. Effect of microphytic crust on emergence of range grasses. MSc-Thesis, School of renewable natural resources[D]. USA: The University of Arizona, 1987.
- [11] 李新荣, 张景光, 王新平, 等. 沙漠地区土壤微生物结皮及其对固沙植被影响的研究[J]. 中国沙漠, 1999, 19(增刊): 165-169.
- [12] 李守中, 肖洪浪, 宋耀选, 等. 腾格里沙漠人工固沙植被区生物土壤结皮对降水的拦截作用[J]. 中国沙漠, 2002, 22(6): 612-616.
- [13] 李守中, 肖洪浪, 罗芳, 等. 沙坡头植被固沙区生物结皮对土壤水文过程的调控作用[J]. 中国沙漠, 2005, 25(2): 228-233.
- [14] 李守中, 郑怀舟, 李守丽, 等. 沙坡头植被固沙区生物结皮的发育特征[J]. 生态学杂志, 2008, 27(10): 165-167.
- [15] 张志山, 何明珠, 谭会娟, 等. 沙漠人工植被区生物结皮类土壤的蒸发特性[J]. 土壤学报, 2007, 44(3): 404-410.
- [16] 陈荷生. 沙坡头地区生物结皮的水文物理特点及其环境意义[J]. 干旱区研究, 1992, 9(2): 31-38.