

基于马尔科夫链模型的长江源区土地覆盖格局变化特征^{*}

杜际增¹ 王根绪^{1**} 李元寿²

(¹中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; ²中国气象局, 北京 100081)

摘 要 利用长江源区 1986、2000 与 2014 年 3 期的遥感影像, 结合实地野外考察获得该地区在这 3 个时间点的土地覆盖类型图。根据各时期之间的土地覆盖格局的变化确定土地类型之间的转移概率, 进一步完成对该地区马尔科夫链模型的构建、检验与预测。结果表明: 1986—2014 年, 长江源区的土地覆盖格局的变化特征符合马尔科夫过程, 通过马尔科夫链模型能够对该地区的覆盖格局变化过程进行有效的模拟; 长江源区的土地覆被退化趋势明显, 湿地、中高覆盖草地等面积不断下降, 裸地、沙地以及低覆盖草地等面积则一直在增加; 2000 年以后, 由于三江源区自然保护区的建立以及降水量的增加等因素影响, 长江源区的植被退化状况得到明显改善。

关键词 马尔科夫过程; 长江源区; 土地覆盖; 转移概率; 退化

中图分类号 X321 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2015)1-0195-09

Changes of land cover pattern in the source region of Yangtze River based on Markov process. DU Ji-zeng¹, WANG Gen-xu^{1**}, LI Yuan-shou² (¹*The Key Laboratory of Mountain Environment Evolution and Regulation, Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; ²*China Meteorological Administrations, Beijing 100081, China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2015, **34**(1): 195–203.

Abstract: Based on the spatial dataset obtained from the TM remote sensing data in 1986, 2000 and 2014, combined with the field investigation data, the maps of the land cover pattern in the source of Yangtze River were made, and the transition probability between all kinds of land cover was determined by using the amplitude of the land cover pattern changes during the three different periods. In addition, Markov model of land cover change in this region was established and validated by the transition probability. The characteristics and tendency of land cover changes were analyzed and forecasted with the Markov model. The results indicated that the characteristics of land cover change were coincided to Markov process, thus, the Markov model could be used to validly simulate the process of land cover change in the source region of Yangtze River. The degradation trend of land cover in the source region of Yangtze River was extremely evident. The areas of wetland and alpine grassland with high-mid coverage continued to decline, while the area of low cover alpine grassland and bare land had consistently been increasing. However, with the establishment of the Three Rivers Headwaters Nature Reserve and the increase of precipitation in this region since 2000, the degradation trend of vegetation has been relieved obviously.

Key words: Markov process; the source region of Yangtze River; land cover change; transition probability; degradation.

^{*} 国家重点基础研究计划项目(2013CBA01807)、国家自然科学基金杰出青年基金项目(40925002)和国家自然科学基金面上项目(41271224)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: wanggx@imde.ac.cn

收稿日期: 2014-06-23 接受日期: 2014-10-18

自然环境的空间变化和人类对土地不同的利用方式形成了不同的土地覆被格局,而土地覆被格局的变化对动物的迁徙、水循环过程以及生物多样性等生态过程会产生重大影响(Turner, 1988; 徐岚等, 1993)。作为我国第一大河的发源地,长江源区集高寒、冻土、冰川与江河集水源区等生态系统为一体,在中国生态平衡、水源安全以及生物多样性保护方面占有十分重要的地位(王根绪等, 2007)。长江源区以草地生态系统为主,在区域的生态系统功能中占据控制地位(Yang *et al.*, 2006);该地区湖泊、沼泽密布,也是世界上湿地分布海拔最高、面积最大与最集中的地区(孙广友等, 1990);而且长江源区是江河源区冰川分布最集中的地区,其冰川面积占整个三江源区的 89% 以上,而冰川融水占源区径流的 25% 以上(沈永平等, 2002)。因此,以草地和湿地等覆被为主的长江源区土地覆被格局对维持该地区生态系统平衡具有重要作用。

土地覆盖变化是气候变化与人类活动等因素综合作用的结果,能够直接反映出人类-环境耦合系统的变化(Liu *et al.*, 2005)。基于冻土环境的长江源区高寒生态系统对气候的变化和人类活动的干扰更加敏感(McGuire *et al.*, 2002),因此长江源区土地覆盖的变化对全球变化的响应也更加明显。随着全球气候变化与人类活动干扰的日益加剧,长江源区的土地覆盖格局正在发生着显著的变化。已有研究表明,在 20 世纪 70 年代以来,该地区的草地出现严重退化,湿地大面积萎缩,冰川迅速消融,并伴随着沙漠化、干旱化以及景观破碎化加剧等现象(杨建平, 2003; 逯军峰等, 2009; 胡光印等, 2010; 邵全琴等, 2010; 郭冻等, 2012)。虽然对长江源区的土地覆被格局的现状、变化特征以及驱动力有了很多研究,然而鲜有通过模型模拟的方式对长江源区土地覆盖格局的变化规律与未来的变化趋势做定量的研究。

本文采用目前提取草地退化信息较为准确的目视综合判读法(刘纪远等, 2008),以野外实地考察建立的遥感解译标志库为基准,对长江源区 1986、2000 与 2014 年 3 个时期的 TM 影像进行解译分析,对比各时期土地覆盖格局得出土地覆盖类型转移矩阵,并以此为基础建立马尔科夫链模型,通过模型完成对长江源区土地覆盖格局变化规律和未来发展趋势的分析。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

本研究区是长江源区。选择以直门达水文站为界,大致位于 90° 43' E—96° 45' E, 32° 30' N—35° 35' N,流域控制面积约 13.78 万 km²(图 1)。地貌上以高山丘陵为主,地势西高东低,水系密集,当曲、沱沱河和楚玛尔河共同组成了长江的 3 个主要源流。研究区段的自然生态系统主要有高寒草原生态系统、高寒草甸生态系统、高寒沼泽湿地生态系统三大类型,局部在一些河谷地带分布稀疏的水柏枝和毛枝山居柳等高寒灌丛,在高大山体上部分布垫状与稀疏流石坡植被。土壤以高山草甸土、高山高原土、高山荒漠土和沼泽土为主。长江源区在气候上属于高原寒带半湿润与半干旱的过渡地带,多年平均气温为-1.0℃,多年平均降水为 387.7 mm(王根绪等, 2004; 逯军峰等, 2009)。

1.2 研究方法

1.2.1 图像的处理方法 本文采用长江源区 1986 年、2000 年与 2014 年 3 个时期的 TM 影像,通过图像镶嵌、裁剪、几何精纠正以及地形图校正对 3 期影像进行标准化处理,然后对长江源区进行实地考察,采用分层抽样的方式在各种覆被类型中采集样本点,然后根据各类样本点在 TM 影像中的波谱特征,建立了 12 大类 23 个亚类的遥感解译标志库(表 1, 图 2)。最后采用模糊分类和目视解译相结合的方法对标准化后的影像进行解译,得出 3 个时期的土地覆被类型图(李郁竹等, 1998; 王根绪等, 2009; Mssie *et al.*, 2011)。

1.2.2 马尔科夫模型建立与检验 马尔科夫过程是一种特殊的随机运动过程。如果一个运动系统 X

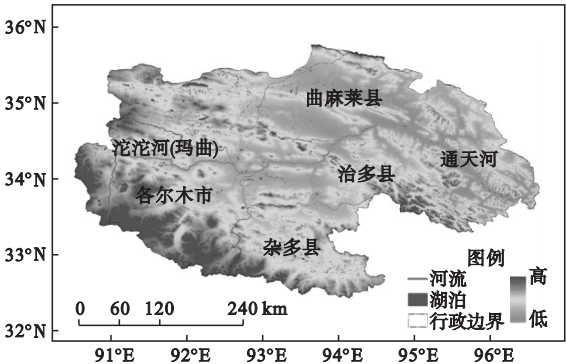


图 1 研究区概况示意图
Fig.1 Sketch map of Yangtze River's source regions

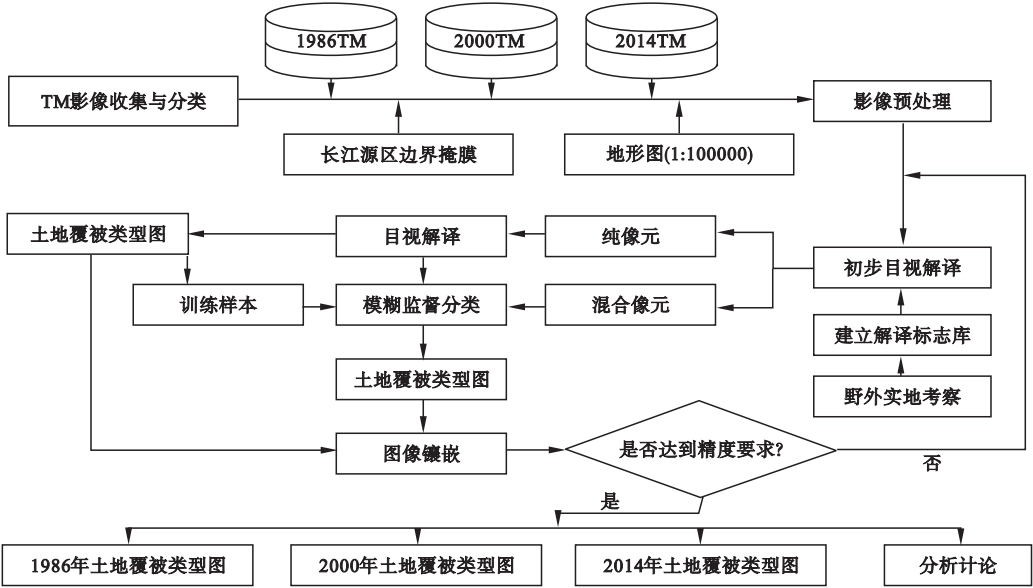


图2 TM影像解译技术流程图
Fig.2 Data and methodology used for image classification and result

的变化过程在 X_{t+1} 的状态仅与 X_t 的状态有关,而与 X_t 以前的状态无关时(1),则称该过程为马尔科夫过程(徐岚等,1993)。

$$x_{t+1} = P \times x_t \tag{1}$$

式中, P 为该过程的转移概率矩阵(2),马尔科夫过程具有无后效性和稳定性,其关键在于转移概率矩阵的确定。

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{n1} & \cdots & P_{nn} \end{bmatrix} \tag{2}$$

表1 长江黄河源区土地覆盖类型
Table 1 Land cover types of source regions of Yangtze River and Yellow River

代号	名称	子集与编码
C&V	人类活动区	包括城市居民地(510),农村居民地(520)、耕地(120)以及人工草地(300)
H-AM	高覆盖高寒草甸	覆盖度>70%(312)
M-AM	中覆盖高寒草甸	50%<覆盖度<70%(322)
L-AM	低覆盖高寒草甸	覆盖度<50%(332)
H-AS	高覆盖高寒草原	覆盖度>50%(311)
H-AS	中覆盖高寒草原	30%<覆盖度<50%(321)
H-AS	低覆盖高寒草原	覆盖度<30%(331)
ASM	典型沼泽草甸	高寒沼泽草甸(640)
WL	湿地	包括河流(410)、湖泊(420)与高寒泥潭沼泽(641)
BL	裸地	包括沙地(610)、盐碱地(630)、滩地(460)、裸土地(620)以及裸岩(660)
L&S	冰川	冰川和永久性积雪(810)
WD	林地	包括乔木林(230)、灌木林(220)、疏林地(210)

P_{ij} 为类型 i 转变成类型 j 的转移概率。其中 P_{ij} 满足2个基本条件:① $P_{ij} \in [0, 1]$; ② $\sum P_{ij} = 1$ 。马尔科夫链模型这些特点用于土地覆盖变化是合适的,因此在模拟自然植被的变化、景观空间变化以及土地利用变化得到了广泛应用(王学雷等,2002;郭笃发,2006;李黔湘等,2008)。

本文基于长江源区1986、2000与2014年3期土地覆被类型分布图,以14年作为步长,根据各个时期土地覆盖类型之间的转变状况,完成对马尔科夫链模型的构建。模型构建完成后,可以根据马尔科夫链基本方程(3)对未来年份的土地覆被变化进行预测:

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_k P_{ik} P_{kj}^{n-1} = \sum_k P_{ik}^{n-1} P_{kj} \tag{3}$$

式中, P 为以已知的土地覆被类型分布状况构建初始状态矩阵, $P_{ij}^{(n)}$ 初始年份以后任何一年类型 i 转变成类型 j 的转移概率,由此可以构建初始年份到以后任何一年的转移概率矩阵,结合方程(1)可以预测未来任何年份长江源区的土地覆被类型所占面积比例的变化。

除此之外,还需要对马尔科夫链模型进行卡方检验(4),判断将该变化抽象成马尔科夫过程是否合理,然后才能根据模型对长江源区土地覆被变化的特征进行分析,并对未来的变化趋势进行模拟。

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j ((N_{ij} - O_{ij})^2 / \overline{O}_{ij}) \tag{4}$$

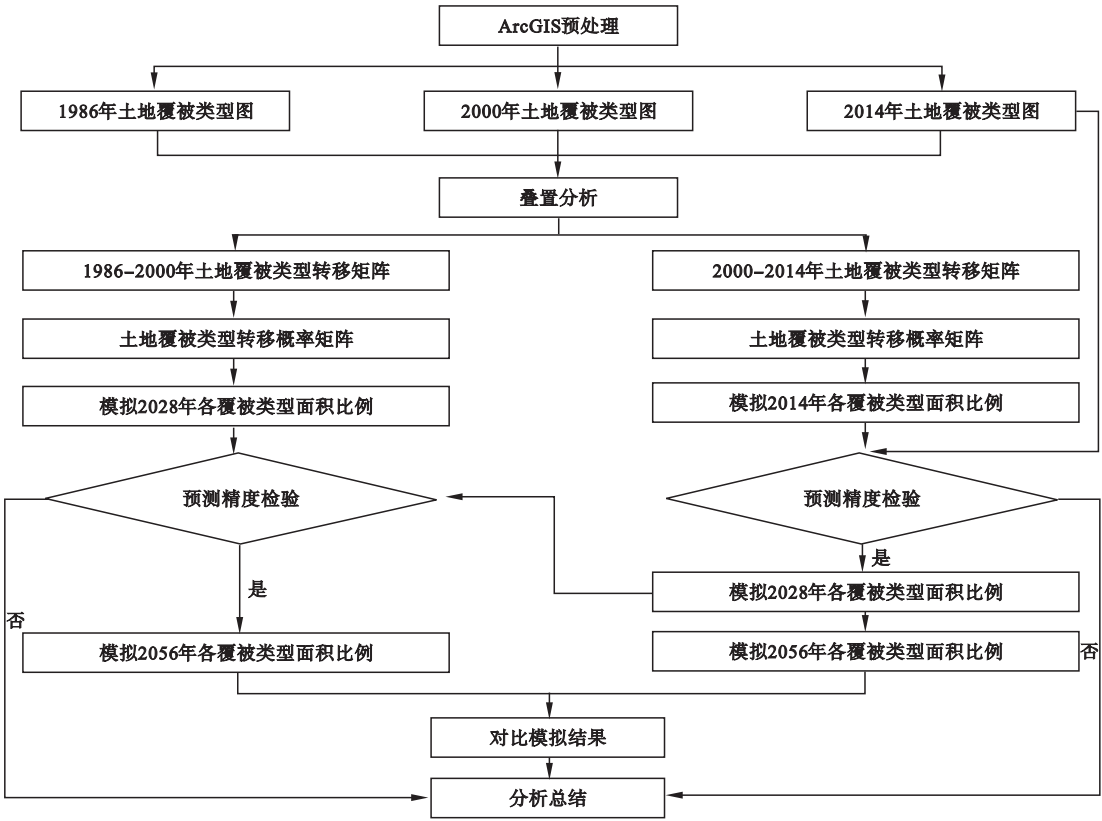


图 3 马尔科夫链模型的校正、模拟与证明过程图
Fig.3 Methodology applied to calibrate, simulate and validate the model

其中, N_{ij} 为实测值, O_{ij} 为模拟值, \bar{O}_{ij} 为模拟期望值。根据自由度和显著度要求在 χ^2 分布表中查到相应的取值范围, 通过判断 χ^2 的计算值是否满足要求来检验马尔科夫链模型的合理性。图 3 是本文马尔科夫链模型构建、检验与预测的流程图。

2 结果与分析

2.1 TM 影像解译结果与分类精度检验

本文采用 USGS 提供的 1986、2000 与 2014 年 3 个时期的长江源区植被生长季(6—9 月)期间的 TM 影像, 根据云量的大小(云量 < 10%) 对影像进一步筛选, 然后采用同一标准对 3 期影像进行镶嵌、裁剪与几何精纠正等预处理。采用目视解译与模糊监督分类相结合的方式对影像进行解译分类, 然后通过 ERDAS 对分类精度进行检验, 最终 1986、2000 与 2014 年 3 期遥感影像分类结果的 KIA 值分别为 87.3%、85.9% 与 88.0%, 达到了土地覆盖遥感分析和建模对遥感影像分类结果精度的要求 (KIA > 85%), 分类结果如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 1986—2014 年, 长江源区的土地覆被类型发生了显著的变化, 主要表现为低覆

盖草地与荒漠化土地大幅增加, 而高覆盖草地和湿地则呈显著减少趋势, 此外, 冰川与多年积雪也出现了明显的退缩。

2.2 马尔科夫链模型的构建与检验

对 1986 年与 2000 年的土地覆盖类型分布图进行叠置分析可以得出长江源区这一时期的土地覆盖类型转移矩阵。从表 2 可以看出, 1986—2000 年, 长江源区面积显著减少的覆被类型有中高覆盖的高寒草地、湿地与冰川等。其中高寒草地的变化特征主要表现为高覆盖草地向中低覆盖草地转变、湿润性的高寒草甸向干旱性的高寒草原转变, 湿地的减少部分则主要转变成高寒草甸与裸地, 冰川由于温度升高导致的退缩而转变成裸地。而低覆盖草地、裸地等覆被类型的面积则呈现相应的增加。此外, 人类活动区的面积也呈现了显著增加的趋势, 表明人类活动对该地区的开发和影响日益增强。

以 1986—2000 年的土地覆盖类型转移矩阵为基础构建该地区的土地覆盖类型转移概率矩阵, 以 1986 年为初始年份, 建立该地区的马尔科夫链模型, 并进一步对长江源区 2014 年的土地覆盖类型组成进行模拟检验(表 3)。

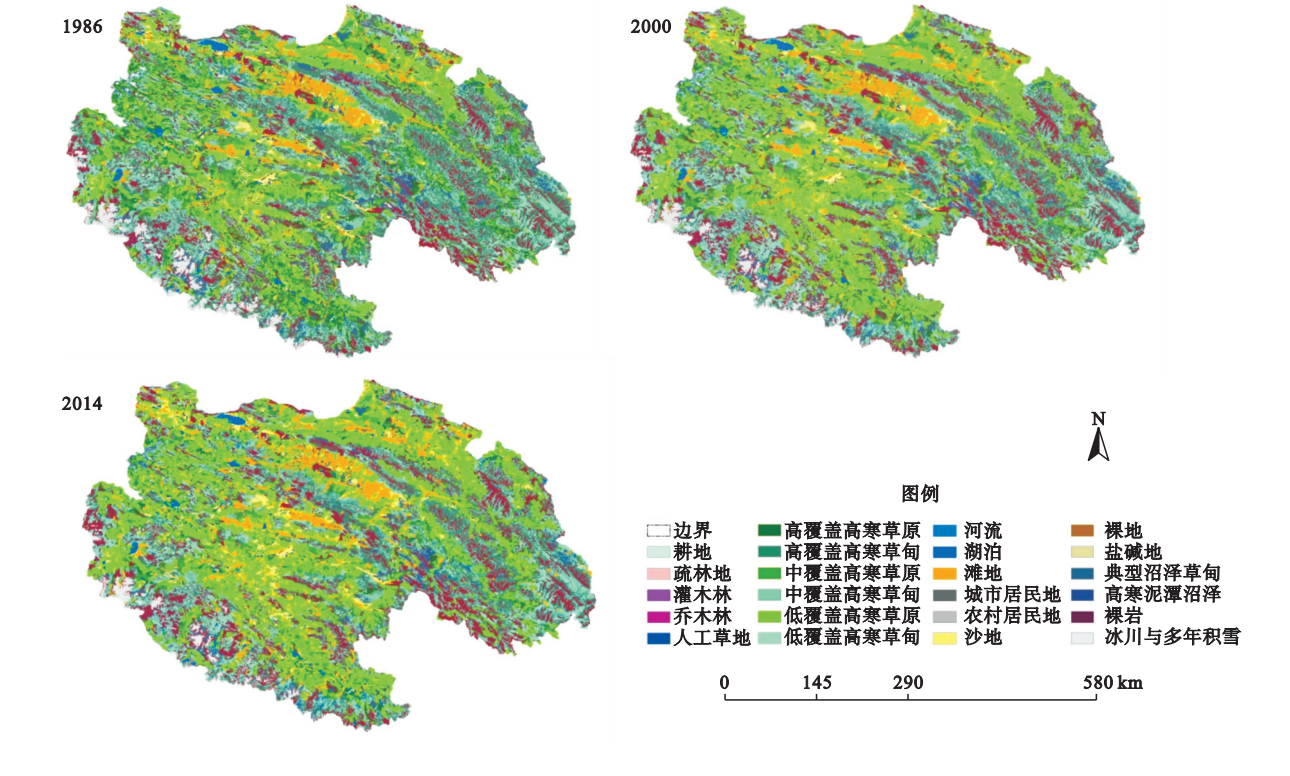


图 4 1986、2000 与 2014 年土地覆被类型分布示意图
Fig.4 Land use/cover in 1986, 2000 and 2014

表 2 1986—2000 年土地覆盖类型转移矩阵(%)
Table 2 Land cover transition matrix from 1986 to 2000

转移比例	H-AS	M-AS	L-AS	H-AM	M-AM	L-AM	ASM	WL	BL	L&S	WD	C&V	△
H-AS	59.5	1.1	0.4	2.5	2.2	0.6	4.5	0.8	0.1	0.0	4.0	15.5	-12.6
M-AS	12.2	70.5	0.7	1.4	4.1	2.7	2.2	0.2	0.3	0.0	2.4	11.0	-12.5
L-AS	10.9	14.5	87.3	1.0	2.3	15.7	2.5	0.1	2.9	0.1	2.4	0.0	11.3
H-AM	1.0	0.2	0.1	89.0	0.6	0.5	5.4	1.4	0.1	0.1	1.0	11.8	-6.7
M-AM	2.7	0.9	0.4	2.6	84.3	1.2	3.3	0.6	0.0	0.0	4.3	8.3	-6.0
L-AM	9.8	9.8	0.8	2.4	5.5	75.6	4.1	0.5	0.6	0.0	7.4	5.9	3.4
ASM	0.9	0.2	0.1	0.5	0.4	0.3	76.4	2.0	0.1	0.0	1.4	3.5	-17.6
WL	0.2	0.1	0.0	0.3	0.1	0.1	0.6	92.3	0.1	0.3	0.9	1.3	-5.1
BL	2.7	2.7	10.1	0.3	0.5	3.2	0.8	2.0	95.8	17.3	68.3	14.7	8.8
L&S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	82.0	0.1	0.0	-16.7
WD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	7.6	-37.8
C&V	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	5.5	20.4	70.7

△代表该时段(1986—2000)各土地覆盖类型的变化量,正数代表增加,负数代表减少。

表 3 1986—2000 年马尔科夫链模型检验
Table 3 Test of Markov Model from 1986 to 2000

类型	H-AS	M-AS	L-AS	H-AM	M-AM	L-AM	ASM	WL	BL	L&S	WD	C&V
2014 <i>N_{ij}</i>	3.0	7.5	22.9	11.2	8.6	10.1	3.7	4.4	27.7	0.8	0.0	0.0
2014 <i>O_{ij}</i>	3.3	8.3	21.7	11.6	9.3	10.1	3.9	4.6	26.3	0.9	0.0	0.0
差值(%)	-0.2	-0.8	1.2	-0.4	-0.7	0.0	-0.2	-0.2	1.4	0.0	0.0	0.0

根据公式(4)计算可得: $\chi^2 = \sum_i \sum_j ((N_{ij} - O_{ij})^2 / \bar{O}_{ij}) = \frac{4.81\%}{8.33} = 0.58\%$,根据 χ^2 临界值表可知: $\chi^2_{0.99(n=11)} = 3.05$,该模型的模拟结果通过了极显著水平的置信度检验,因此以 1986—2000 年马尔科夫链模型模拟长江源区土地覆盖变化是可行的。

以同样的方法对长江源区 2000 年与 2014 年的土地覆被类型图进行叠置分析可得该时段的土地覆盖类型转移矩阵(表 4),从表 4 可以看出,2000—2014 年,长江源区土地覆盖类型的变化趋势与上一时期基本一致,但变化幅度显著降低。此外,人类活动区的面积增长速度大大加快。以 2000 年为初始年份,以 2000—2014 年间的土地覆盖类型转移矩阵基础构建该地区的土地覆盖类型转移概率矩阵,建立马尔科夫链模型,与 1986—2000 马尔科夫链模型共同模拟 2028 年长江源区土地覆盖状况。对比两个模型的模拟结果,从而完成对 2000—2014 年马尔科夫链模型的检验。

表 5 中 $2028N_{ij}$ 表示通过 1986—2000 年马尔科夫链模型预测出的长江源区 2028 年的土地覆盖类型组成比例, $2028O_{ij}$ 表示通过 2000—2014 年马尔科夫链模型模拟出的长江源区 2028 年的土地覆盖类型组成比例。根据公式(5)计算可得: $\chi^2 =$

$\sum_i \sum_j ((N_{ij} - O_{ij})^2 / \bar{O}_{ij}) = \frac{16.83\%}{8.33} = 2.02\%$,根据 χ^2 临界值表可知: $\chi^2_{0.99(n=11)} = 3.05$,该模型的模拟结果通过了极显著水平的置信度检验,因此以 2000—2014 年马尔科夫链模型模拟长江源区土地覆盖变化也是可行的。

2.3 基于马尔科夫链模型的预测与对比分析

通过对马尔科夫链模型模拟结果的检验后,分别根据 1986—2000 年与 2000—2014 年马尔科夫链模型对 21 世纪中叶(2056 年)长江源区的土地覆盖类型分布进行预测,并对 2 个模型的模拟结果进行对比分析。

如图 5 所示,2056(1)代表根据 1986—2000 年马尔科夫链模型所预测的 2056 年土地覆盖类型的分布,2056(2)代表根据 2000—2014 年马尔科夫链模型所预测的 2056 年土地覆盖类型的分布。与长江源区 2000 年的土地覆盖类型分布相比,两种预测结果都表现出大致相同的趋势,即中高覆盖草地、湿地等覆被类型的面积下降而低覆盖草地与裸地的面积增加。但在变化的幅度上则表现出显著的差异,前者的变化幅度远远大于后者。与 2000 年相比,前一模型所预测的中高覆盖高寒草地的面积减少了 $1.08 \times 10^4 \text{ km}^2$,占原面积的 27.1%;沼泽草甸面积下

表 4 2000—2014 年土地覆盖类型转移矩阵(%)
Table 4 Land cover transition matrix from 2000 to 2014

转移比例	H-AS	M-AS	L-AS	H-AM	M-AM	L-AM	ASM	WL	BL	L&S	WD	C&V	△
H-AS	74.9	0.7	0.5	1.1	2.3	0.5	2.7	0.3	0.1	0.0	1.7	8.5	-4.0
M-AS	6.3	89.7	0.3	1.0	1.5	0.7	1.0	0.2	0.3	0.0	0.5	10.9	-1.8
L-AS	5.6	2.6	91.8	0.5	2.4	6.0	1.3	0.1	3.5	0.2	0.9	4.4	2.5
H-AM	0.9	0.2	0.0	93.6	0.4	0.3	4.1	0.4	0.0	0.1	0.1	8.7	-3.6
M-AM	5.6	2.5	0.3	1.9	91.3	1.5	2.0	0.1	0.0	0.0	0.1	8.1	1.8
L-AM	4.3	2.7	0.8	1.2	1.4	89.3	3.6	0.3	0.5	0.0	0.7	9.1	0.3
ASM	0.5	0.1	0.0	0.5	0.3	0.1	84.3	0.5	0.0	0.1	0.3	7.4	-12.1
WL	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	97.8	0.0	0.3	0.1	4.5	-1.4
BL	1.9	1.4	6.2	0.2	0.3	1.4	0.5	0.3	95.5	11.9	21.7	9.7	2.8
L&S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	87.3	0.0	0.0	-11.9
WD	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	56.1	16.4	0.0
C&V	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	17.7	12.2	176.5

△代表该时段(2000—2014)各土地覆盖类型的变化量,正数代表增加,负数代表减少。

表 5 2000—2014 年马尔科夫链模型检验
Table 5 Test of Markov Model form 2000 to 2014

类型	H-AS	M-AS	L-AS	H-AM	M-AM	L-AM	ASM	WL	BL	L&S	WD	C&V
2028 N_{ij}	3.2	8.2	22.2	11.2	9.4	10.1	3.5	4.5	27.0	0.7	0.0	0.0
2028 O_{ij}	2.7	6.8	24.2	10.4	8.1	10.0	3.2	4.2	29.8	0.7	0.0	0.0
差值(%)	0.4	1.4	-2.0	0.8	1.4	0.2	0.3	0.3	-2.8	0.1	0.0	0.0

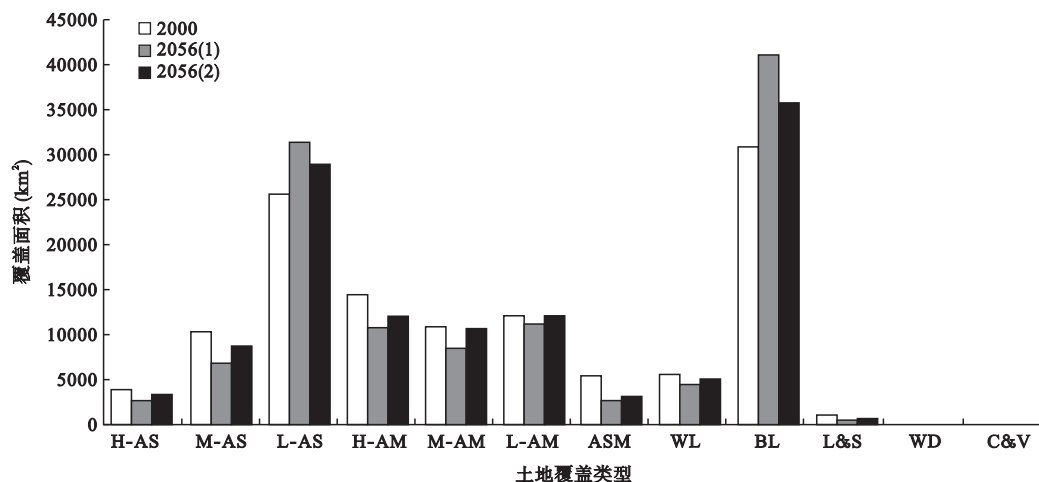


图5 长江源区土地覆盖类型分布变化趋势

Fig.5 Trend of the land cover change of the source of Yangtze River

横坐标轴为各土地覆被类型的代码,详见表1。

降了 $2.62 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占原面积的 48.2%; 湿地面积减少了 $1.06 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占原面积的 18.9%; 冰川面积减少了 577.1 km^2 , 占原面积的 49.2%; 低覆盖草地增加了 $4.97 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占原面积的 13.1%; 裸地增加了 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占原面积的 32.7%。后者预测的中高覆盖高寒草地的面积下降了 $2.75 \times 10^3 \text{ km}^2$, 减少了 6.9%; 沼泽草甸面积减少了 $2.09 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占原面积的 38.4%; 湿地面积减少了 307.9 km^2 , 占原面积的 5.5%; 冰川面积减少了 460.8 km^2 , 占原面积的 39.5%; 低覆盖草地增加了 $2.27 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占原面积的 6.0%; 裸地面积增加了 $3.32 \times 10^3 \text{ km}^2$, 占原面积的 10.7%。从以上数据可以看出, 与 1986—2000 年马尔科夫链模型相比, 2000—2014 年马尔科夫链模型所预测出的长江源区土地覆被的高寒草地和湿地的退化幅度显著降低, 而冰川的退缩幅度也略有下降。

3 讨论

本研究发现, 1986—2014 年长江源区的土地覆被出现显著的变化。源区植被呈覆盖度降低、干旱化、荒漠化的退化格局, 覆盖度降低主要表现为中高覆盖草地向低覆盖草地转移, 低覆盖草地向裸地转移; 干旱化主要表现为对水分要求比较高的植被向水分要求较低的植被群落转移, 如沼泽草甸向典型的草甸或草原转移, 高寒草甸向高寒草原转移, 湿地向草地或裸地转移; 荒漠化主要表现为植被面积的减少与裸地面积的增加, 在主要的植被中低覆盖高寒草地的荒漠化最为严重, 其次是中高覆盖高寒草

原与低覆盖高寒草甸。这一时期长江源区的冰川也出现大面积退缩, 冰川退缩后使底层基岩裸露, 从而表现为大面积的冰川转变成裸岩。此外, 林地和人类活动区也出现了明显的变化, 即人类活动区的大幅度扩张和林地面积显著下降, 但是这 2 种覆被类型的面积比较小, 对整个长江源区的影响甚微, 但是人类活动区与人类对长江源区的干扰程度相关, 对长江源区生态系统的间接影响不容忽视。刘纪远等 (2008) 和邵全琴等 (2010) 对该地区植被变化的研究发现了相同的退化趋势, 但邵全琴等 (2010) 所得到的 2004 年以后该区域的植被呈转好趋势的结论与本研究明显不同, 导致这种分歧的原因可能有两个: 首先是研究的尺度差异, 前人研究多以三江源区为研究对象, 其他两个源区的植被变化在统计时可能会稀释或改变长江源区植被变化趋势; 其次是研究时间尺度的不同, 不同的时间尺度上统计结果可能出现差异。总体来说, 现有研究对长江源区土地覆被变化长期规律的认识尚不明确, 需要进一步的研究观测。

长江源区的土地覆盖变化是一个在空间格局上影响范围大, 在时间过程上持续时间长的连续变化过程 (刘纪远等, 2008)。马尔科夫链模型是根据事件发生概率和初始状态对未来状态变化趋势进行预测的方法, 由于十分适合对条件稳定下的长期连续变化进行模拟, 马尔科夫链模型在土地利用/覆盖变化、植被演替预测等研究方面得到广泛的应用 (阳含熙等, 1988; Pedro *et al.*, 2009; Mssie *et al.*, 2011), 因此将长江源区土地覆盖变化过程假设成马尔科夫

过程在理论上是合理的。通过对马尔科夫链模型的模拟检验可知,该假设在置信度 99% 的极显著水平上成立。长江源区土地覆盖变化符合马尔科夫过程,一定程度上表明该变化是持续渐变的,是一种生态格局的必要条件失衡后逐渐达到另一种平衡的过程。研究表明,导致长江源区覆被变化的失衡条件可能是气温、降水等气候条件,也可能是人类活动引起的人为干扰,由于这些条件的变化都是短期渐变过程和长期往复过程的统一体,因此在相对短的时间段内利用马尔科夫链模型对长江源区的土地覆盖变化进行预测研究是可行的。

通过对比 1986—2000 与 2000—2014 年这 2 个时期的土地覆盖转移矩阵以及所预测出 2056 年土地覆盖面积比例,表明长江源区的植被在 2000 年以后虽然仍呈退化趋势,但这一现象得到了明显的改善。与上一时期相比,2000—2014 年的中高覆盖草地的面积减少幅度降低了 7.55% (每 14 年,下同),沼泽草甸的面积下降幅度降低了 5.5%,湿地的面积减少幅度下降了 3.7%。其他的覆被类型变化,如冰川退缩的幅度也降低了 4.8%,而人类活动区的面积却大幅增长,比上一时期上升了 105.8%。研究认为,引起长江源区的退化格局发生变化的原因可能有以下两方面:一方面是人为原因,自 2000 年以后,中国建立了三江源自然保护区,并于 2005 年颁布实施了《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》,加强了对长江源区的生态建设和环境保护,并且采取了退牧还草、牧民进城与加强源区生态保护宣传等一系列切实可行的措施,使长江源区的生态环境得到了一定程度的恢复和改善,这与赵志平等 (2010) 的研究结论一致;另一方面是长江源区气候的变化,在气温不断上升的同时,研究区的降水量在 2000 年以后连续显著的上升,根据曲麻莱、沱沱河与五道梁 3 个气象站观测数据的平均状况来看,长江源区年平均降水量比上一时期增加了 53.7 mm,降水量的增加缓解了长江源区随增温而日益加强的水分胁迫,从而抑制了长江源区植被的退化,这与杨元合等 (2006) 的研究结论一致。

本文认为,应主要从气候因素和人为因素两个方面分析长江源区植被退化格局变化的驱动因素。从研究区 2000—2014 年植被退化速率的下降幅度以及人类干预措施实施的同步性来看,三江源自然保护区的建立与《青海三江源自然保护区生态保护和建设总体规划》的实施是改善长江源区植被退化

状况的关键因素,而降水量的增加在一定程度上抑制了该地区植被退化的趋势。长江源区冰川的退缩则与气温的持续升高有关,通过统计长江源区该时期的气象观测数据可知,该地区的年平均气温一直以 $0.41\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot 10\text{ a}^{-1}$ 的速率上升。长江源区人类活动区的大幅度增加可能与该地区青藏铁路的修建有关,铁路的修建使人类在该地区的活动更加便利,增强了人类开发这一地区的能力。由于缺乏该地区详细的气候、植被等方面数据,很难通过定量的方式来准确分析该地区土地覆盖变化的驱动因素。需要进一步通过大量的野外观测,并引进陆面过程模型等研究手段,进一步分析该地区覆被变化的驱动因素。

综上所述,可得出以下结论:(1)近 28 年来,长江源区的土地覆盖发生了显著的变化。以高寒草地为主的植被形成了覆盖度降低、干旱化、荒漠化为主的退化格局,湿地和冰川大面积萎缩,而人类活动区面积不断大幅增加。(2)利用马尔科夫链模型模拟长江源区土地覆盖组成变化,马尔科夫链模型的预测结果与实际情况基本吻合,通过了 99% 水平的置信度检验,表明通过马尔科夫链模型模拟长江源区土地覆盖组成的变化是合理可行的。(3)通过对比 1986—2000 与 2000—2014 年土地覆盖类型转移矩阵,以及根据两个时期建立的马尔科夫链模型对本世纪中叶长江源区土地覆盖组成的预测结果对比发现:2000 年以后,由于三江源自然保护区的建立与气候条件的改善,有效抑制长江源区的植被退化趋势,使植被和湿地的退化幅度明显降低。本研究认为,人为因素是长江源区土地覆被变化状况改善的主要原因,以降水增加为主的气候变化是缓解该地区覆被退化的重要因素。

参考文献

- 郭 烁,杜世宏,薛达元,等. 2012. 长江源区土地覆盖变化与草地退化格局的时空分异. 应用生态学报, **23**(5): 1219–1225
- 郭笃发. 2006. 利用马尔科夫过程预测黄河三角洲新生湿地土地利用/覆被格局的变化. 土壤, **38**(1): 42–47.
- 胡光印,董治宝,逯军峰,等. 2010. 长江源区沙漠化土地遥感调查及分析. 中国沙漠, **30**(3): 505–509.
- 李黔湘,王华斌. 2008. 基于马尔科夫模型的涨渡湖流域土地利用变化预测. 资源科学, **30**(10): 1541–1546.
- 李郁竹,曾 燕. 1998. 应用 NOAA/AVHRR 数据测算局地水稻种植面积. 遥感学报, **2**(2): 125–130.
- 刘纪远,徐新良,邵全琴. 2008. 近 30 年来青海三江源地区草地退化的时空特征. 地理学报, **63**(4): 364–376.
- 逯军峰,董治宝,胡光印,等. 2009. 长江源区土地利用/覆

- 盖现状及成因分析. 中国沙漠, **29**(6): 1043-1048.
- 邵全琴, 赵志平, 刘纪远, 等. 2010. 近 30 年来三江源地区土地覆被与宏观生态变化特征. 地理研究, **29**(8): 1439-1451.
- 沈永平, 王根绪, 吴青柏, 等. 2002. 长江-黄河源区未来气候情景下的生态环境变化. 冰川冻土, **24**(3): 308-314.
- 孙广友, 邓 伟, 邵庆春. 1990. 长江黄河源区冰缘环境沼泽的研究. 地理科学, **10**(1): 86-92.
- 王根绪, 丁永健, 王 建, 等. 2004. 近 15 年来长江黄河源区的土地覆盖变化. 地理学报, **59**(2): 163-167.
- 王根绪, 李 娜, 胡宏昌. 2009. 气候变化对长江黄河源区生态系统的影响及其水文效应. 气候变化研究进展, **5**(4): 202-208.
- 王根绪, 李元寿, 王一博, 等. 2007. 长江源区高寒生态与气候变化对河流径流过程的影响分析. 冰川冻土, **29**(2): 159-167.
- 王学雷, 吴宜进. 2002. 马尔科夫模型在四湖地区湿地景观变化研究中的应用. 华中农业大学学报, **21**(3): 288-291.
- 徐 岚, 赵 羿. 1993. 利用马尔科夫过程预测东陵区土地利用格局的变化. 应用生态学报, **4**(3): 272-277.
- 阳含熙, 播愉德, 伍业钢. 1988. 长白山阔叶红松林马氏链模型. 生态学报, **42**(3): 211-219.
- 杨建平, 丁永建, 刘时银, 等. 2003. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响. 自然资源学报, **18**(5): 595-602.
- 杨元合, 朴世龙. 2006. 青藏高原草地植被覆盖变化及其与气候因子的关系. 植物生态学报, **30**(1): 1-8.
- 赵志平, 刘纪远, 邵全琴. 2010. 三江源自然保护区土地覆盖变化特征分析. 地理科学, **30**(3): 415-420.
- Liu JY, Liu ML, Tian HQ, *et al.* 2005. Spatial and temporal patterns of China's cropland during 1990-2000: An analysis based on Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, **98**: 442-456.
- McGuire AD, Wirth C, Apps M, *et al.* 2002. Environmental variation, vegetation distribution, carbon dynamics and water/energy exchange at high latitudes. *Journal of Vegetation Science*, **13**: 301-314.
- Mssie GT, Pedro C. 2011. Urban Sprawl and Modeling in Asmara, Eritrea. *Remote Sensing*, **3**: 2148-2163.
- Pedro C, Alexander Z. 2009. Markov processes in modeling land use and land cover changes in Sintra-Cascais, Portugal. *Dyna*, **76**: 191-198.
- Turner MG. 1988. A spatial simulation model of land use change in a Piedmont County in Georgia. *Applied Mathematics and Computation*, **27**: 39-51.
- Yang JP, Ding YJ, Chen RS. 2006. Spatial and temporal variations alpine vegetation cover in the source regions of the Yangtze and Yellow rivers of the Tibetan Plateau from 1982 to 2001. *Environmental Geology*, **50**: 313-322.

作者简介 杜际增, 男, 1992 年生, 硕士研究生, 主要从事山地水文与水生态方面的研究. E-mail: dujz08@lzu.cn

责任编辑 张 敏
