

藏北高原地表覆盖时空动态及其对气候变化的响应*

宋春桥^{1,2,4} 游松财^{3**} 柯灵红^{1,2} 刘高焕¹ 钟新科^{1,2}

(¹中国科学院地理科学与资源研究所资源与环境信息系统国家重点实验室,北京 100101; ²中国科学院研究生院,北京 100049; ³中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所,北京 100081; ⁴香港中文大学地理与资源管理系,香港)

摘要 利用2001—2008年逐年的MODIS地表覆盖类型产品,根据藏北高原地表覆被特征对原始数据进行合并处理,得到每年藏北高原地表覆盖类型图;运用分类统计、动态转移矩阵、景观格局指数方法分析藏北高原地表覆盖类型的变化,并结合研究区内气象台站观测数据分析地表覆盖类型转化对气候变化的响应特征。结果表明:研究期间,由于气候变暖速率的加快,研究区冰川雪被消融加速,冰川面积迅速萎缩,融化的雪水汇集到高原湖盆,使湖面水位上升,湖泊面积增加,部分被淹没的草地形成湿地;植被覆盖状况没有表现出明显的变好或退化趋势,2001—2004年为气候暖湿化阶段,荒漠裸地减少、稀疏草地和草地覆盖面积增加,2006—2007年为气候暖干化阶段,荒漠面积增加、稀疏草地面积减小;2001—2008年,藏北高原景观破碎度减小,地表覆盖异质性降低,且各类型所占比例的差异有所加大。

关键词 地表覆盖 藏北高原 气候变化 MODIS

文章编号 1001-9332(2011)08-2091-07 **中图分类号** X24 **文献标识码** A

Spatiotemporal dynamics of land cover in northern Tibetan Plateau with responses to climate change. SONG Chun-qiao^{1,2,4}, YOU Song-cai³, KE Ling-hong^{1,2}, LIU Gao-huan¹, ZHONG Xin-ke^{1,2} (¹State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; ²Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; ³Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; ⁴Department of Geography and Resource Management, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(8): 2091-2097.

Abstract: By using the 2001-2008 MODIS land cover products (MCD12Q1) and based on the modified classification scheme embodied the characteristics of land cover in northern Tibetan Plateau, the annual land cover type maps of the Plateau were drawn, with the dynamic changes of each land cover type analyzed by classification statistics, dynamic transfer matrix, and landscape pattern indices. In 2001-2008, due to the acceleration of global climate warming, the areas of glacier and snow-covered land in the Plateau decreased rapidly, and the melted snow water gathered into low-lying valley or basin, making the lake level raised and the lake area enlarged. Some permanent wetlands were formed because of partially submersed grassland. The vegetation cover did not show any evident meliorated or degraded trend. From 2001 to 2004, as the climate became warmer and wetter, the spatial distribution of desert began to shrink, and the proportions of sparse grassland and grassland increased. From 2006 to 2007, due to the warmer and drier climate, the desert bare land increased, and the sparse grassland decreased. From 2001 to 2008, both the landscape fragmentation degree and the land cover heterogeneity decreased, and the differences in the proportions of all land cover types somewhat enlarged.

Key words: land cover; northern Tibet Plateau; climate change; MODIS.

* 国家自然科学基金项目(40971132)资助。

** 通讯作者。E-mail: yousc@ieda.org.cn

2010-12-31 收稿, 2011-05-11 接受。

20世纪全球陆面的平均气温增加了 $0.4\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,升温幅度大于过去1000 a以来的任何一个世纪,1950—2000年陆地地面温度日较差下降,夜间最低温度的上升速度是白天最高温度上升速度的2倍^[1-2]. 1951—2009年,青藏高原存在着显著的升温过程,该升温趋势超过同期北半球和同纬度地区的平均水平,与低海拔地区相比,青藏高原地区对全球气候变化的响应更明显^[3-4]. 藏北地处青藏高原腹地,是重要的江河源和生态环境敏感区,也是中国重要的草场畜牧业基地^[5]. 在全球变暖的大背景下,许多学者对藏北地区生态环境展开了大量研究. 如杨凯等^[6]、张建平等^[7]研究结果表明,1982—2004年间藏北高原草地出现大范围严重退化,草场生产力下降,生态系统极其脆弱;高清竹等^[8]基于Landsat TM影像分析了1990—2000年藏北高原景观格局的变化,结果表明,高寒草甸、草原和冰川等类型的景观面积减少,生态环境趋于恶化;边多等^[9]、鲁安新等^[10]基于中高分辨率遥感影像分析了20世纪末的40年间藏北地区湖泊、冰川面积和体积的变化,研究发现冰川消融、湖泊水位下降等与气候变暖的关系密切.

地表覆盖变化客观地反映了全球变化及人类活动对地球下垫面的影响,可再现地球表面自然景观的变化过程^[11]. 以往关于土地覆盖类型或景观格局变化的研究大多基于2期或几个时间点的中高分辨率Landsat TM/ETM或CBERS遥感影像进行分析,但由于传感器寿命以及时间分辨率、数据质量等问题,这类遥感数据对于2000年以后藏北高原这种区域性地表覆盖的动态监测具有诸多限制. 20世纪80年代中期以来,青藏高原的升温速率有所加快^[12-14]. 而21世纪以来,气候变化对藏北高原生态环境脆弱性的影响以及该地区地表覆盖的变化都有待深入探讨. 1999年下半年开始,美国国家航空航天局(NASA)免费发布MODIS卫星数据产品,该数据具有时间分辨率高、空间分辨率适中等优势,在土地覆盖分类和地表覆盖动态监测等方面得到了广泛应用^[15-17]. MCD12Q1数据是MODIS Terra卫星和Aqua卫星年合成的地表覆盖类型(LC)数据产品(500 m空间分辨率). MODIS土地覆盖产品的精度验证结论表明,全球MCD12Q1土地覆盖产品总体精度为75%~80%,不同土地覆盖类型的分类精度为60%~90%^[18]. 为此,本文基于2001—2008年MODIS MCD12Q1地表覆盖类型数据,分析了2001—2008年藏北高原地表覆盖动态,并结合气象

站点记录的气候数据分析了地表覆盖动态与气候变化的关系.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

藏北高原($30^{\circ}27'25''\text{--}35^{\circ}39'13''\text{ N}$, $83^{\circ}41'14''\text{--}95^{\circ}10'46''\text{ E}$)幅员辽阔,平均海拔在4500 m以上,西北起于昆仑山和唐古拉山,与新疆、青海交界;南抵念青唐古拉山,与日喀则、拉萨和林芝等地(市)相邻;东接昌都地区的边坝县和丁青县;西与阿里地区的改则县和措勤县相连(图1). 作为重要的畜牧业生产基地,草地是该区域主要的生态系统. 研究区大部分地区属亚寒带气候,寒冷干燥,年均气温 $-2.8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量247.3~513.6 mm,受大气环流和地形的影响,降水总体趋势表现为由东向西、由南向北递减. 受水平和垂直地带性影响,该区气候和水热条件的区域间差异较大,植被覆盖从东南向西北依次为亚高山疏林-灌丛草甸、高寒草甸、高寒草原、高寒荒漠草原四大基带及相邻的过渡亚带^[19].

1.2 数据来源与预处理

1.2.1 MODIS地表覆盖产品 从NASA数据中心免费申请下载了藏北高原2001—2008年共8期的MODIS地表覆盖类型数据,原始数据格式为HDF,基于MRT和ENVI软件对原始数据进行格式转换、投影、裁剪等预处理. 该产品包括国际地圈生物圈计划(IGBP)全球植被分类方案、马里兰大学(UMD)植被分类方案、植被功能类型(PFT)方案、MODIS

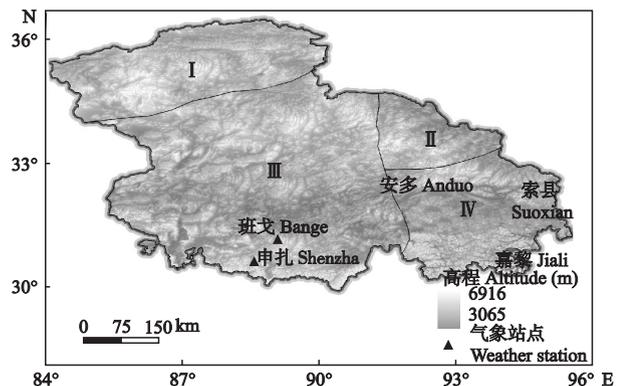


图1 研究区地理位置和地形

Fig. 1 Geographic location and topography of the study area.

I: 昆仑高山高原亚寒带干旱区 Kunlun Mountain subfrigid and arid zone; II: 青南高原亚寒带半干旱区 South Qinghai Plateau subfrigid and semi-arid zone; III: 羌塘高原湖盆亚寒带半干旱区 Qiangtang Plateau subfrigid and semi-arid zone; IV: 那曲高山谷地高原亚寒带半湿润区 Naqu Mountain subfrigid and semi-humid zone.

提取净第一生产力(NPP)方案和 MODIS 提取叶面积指数/光合有效辐射分量(LAI/fPAR)方案. 考虑到其他 4 种地表覆盖类型方案均针对特殊的应用目的而设计, 本文选择通用于分析地表覆盖类型的 IGBP 分类方案所表示的数据, 该分类法将土地类型划分为 17 类, 包括 11 类自然植被类型、3 类土地利用和土地镶嵌、3 类无植生土地类型(表 1). 藏北高原分布最广的地表覆盖类型是草地, 林地和灌丛等的分布面积很小, 因此, 本文对上述 17 种地类进行适当合并, 合并的主要原则是对空间上地域邻近的相似地表覆盖类型(可反映水热条件的近似性)进行合并, 并将植被类型分类方案中二级分类向一级分类归并. 合并后藏北高原地表覆盖类型包括 9 类, 分别为湖泊、冰川雪盖、林地、草地、稀疏草地、荒漠、农牧混合区、湿地和建筑用地. 依据合并后的 9 种地表覆盖分类方案, 对 2001—2008 年 MODIS 地表覆盖类型产品进行处理, 得到逐年藏北高原地表覆盖类型图.

1.2.2 气象站点观测数据 藏北高原的气象站点分布稀疏, 且主要分布在东部和中部地区, 包括索县、比如、嘉黎、那曲、安多、申扎、班戈 7 个气象台站(图 1). 从中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn/index.jsp>)获取 7 个台站 2000—2008 年的年均气温和年降水量.

1.3 研究方法

本文采用景观指数法定量分析研究期间藏北高原地表覆盖类型的变化. 选择斑块数、斑块密度描述斑块类型特征, 运用景观多样性指数、均匀度指数、聚集度指数和形状指数分析区域景观格局.

斑块密度(PD)可反映斑块破碎化程度以及景观空间异质性程度. PD 值越大, 破碎化程度越高, 空间异质性程度也越大.

$$PD = n_i / A_i \quad (1)$$

式中: PD 为某类斑块密度(个·km⁻²); n_i 为景观中某类斑块的数量; A_i 为景观面积(km²).

Shannon 多样性指数(Shannon's diversity index, SHDI)可反映景观要素的多少和各景观要素所占比例的变化. 当景观由单一要素构成时, 景观为均质, 其多样性指数为 0; 当景观由 2 个以上要素构成, 且各景观类型所占比例相等时, SHDI 值最高; 各景观类型所占比例差异增大, 则景观多样性下降.

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i \quad (2)$$

式中: P_i 为景观类型 i 的面积比例; m 为景观类型的数目.

Shannon 均匀度指数(Shannon's evenness index, SHEI)指不同景观要素的分配均匀程度. $0 \leq SHEI \leq 1$, SHEI=0 表示景观由 1 个斑块构成; SHEI 值增加表示景观中不同类型的斑块数目增加或景观中不同类型斑块的比例趋于均衡.

$$SHEI = \frac{- \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i}{\ln m} \quad (3)$$

式中: P_i 为景观要素 i 的面积比例; m 为景观类型的数目; $- \sum_{i=1}^m P_i \ln P_i$ 、 $\ln m$ 分别为 Shannon 多样性指数及其最大值.

聚集度指数(contagion index, CONTAG)指景观中不同斑块类型的聚集程度或延展趋势. 一般来说, CONTAG 值越高, 说明景观中某种优势斑块类型形成了良好的连接性; 反之则表明景观是具有多种要素的密集格局, 景观的破碎化程度较高.

$$CONTAG = \left(1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{P_{ij} \ln P_{ij}}{2 \ln m} \right) \times 10^2 \quad (4)$$

式中: P_{ij} 为第 i 类景观中斑块 j 的周长.

景观形状指数(landscape shape index, LSI)也称边界发育程度指数, 公式如下:

$$LSI = \frac{P_i}{\sqrt{2\pi A_i}} \quad (5)$$

式中: P_i 为景观类型 i 的周长; A_i 为景观类型 i 的面

表 1 MCD12Q1 产品 IGBP 土地分类方案及其代码

Table 1 IGBP land cover classification scheme and codes in MCD12Q1 product

| 代码 Code | 类型 Type | 代码 Code | 类型 Type | 代码 Code | 类型 Type |
|------------|--|------------|-------------------------|------------|--|
| 0 | 水体 Water | 6 | 封闭灌丛 Closed shrub | 12 | 农田 Cropland |
| 1 | 常绿针叶林 Evergreen coniferous forest | 7 | 开放灌丛 Open shrub | 13 | 城镇与建设用地 Urban and built-up |
| 2 | 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest | 8 | 木本稀树草原 Woody savanna | 14 | 农田/自然植被混合 Cropland/Natural vegetation |
| 3 | 落叶针叶林 Deciduous coniferous forest | 9 | 稀树草原 Savanna | 15 | 冰雪覆被 Snow and ice |
| 4 | 落叶阔叶林 Deciduous broad-leaved forest | 10 | 草原 Grassland | 16 | 荒漠及荒漠草原 Desert and desert steppe |
| 5 | 混交林 Mixed forest | 11 | 永久湿地 Permanent wetland | 254 | 未分类 Unclassified |

积. LSI 值越趋近于 1, 说明斑块形状越趋近圆, LSI 值越大, 斑块形状越复杂.

2 结果与分析

2.1 藏北高原地表覆盖类型动态

2001—2008 年间, 藏北高原分布最广的地类为草地、稀疏草地和荒漠, 分别占研究区总面积的 45%、20% 和 25%, 呈东南-西北方向过渡分布; 湖泊和冰川雪盖也有大量分布, 分别占全区总面积的 2.5% 和 1.5%; 林地、农牧混合区、湿地只是零散分布, 面积比例极小. 由于遥感影像的空间分辨率为 500 m, 居民地通常无法表现, 只能反映那曲地区驻地和少数几个县城所在地, 仅 22 个像元, 研究期间居民地面积在该尺度上基本无变化.

由图 2 可以看出, 2001—2008 年, 研究区湖泊、湿地与冰川雪盖的面积变化最明显, 并且表现出相反的变化趋势: 冰川雪盖面积不断减少, 从 2001 年的 $1.04 \times 10^4 \text{ km}^2$ 减少到 2008 年的 $0.60 \times 10^4 \text{ km}^2$, 主要原因在于念青唐拉山脉和唐古拉山脉的高山冰雪消融, 特别是嘉黎县境内的念青唐拉山脉东南部的冰川萎缩最严重; 湖泊面积不断增加, 从 2001 年的 $1.22 \times 10^4 \text{ km}^2$ 扩大到 2008 年的 $1.32 \times 10^4 \text{ km}^2$, 面积扩张的湖泊主要分布于藏北高原西部和北部地区, 如双湖区的多格错仁、尼玛县的当若雍错以及西藏第二大湖色林错; 增加的湿地主要分布在几大湖

泊周围, 主要是湖泊扩张使周边草地和水域之间形成的过渡区域.

草地、稀疏草地和荒漠的面积没有明显的变化趋势, 只表现为年际间的波动. 随不同年份水热条件和人类活动强度的不同, 三者之间相互转化: 2001—2003 年, 荒漠面积减少, 稀疏草地和草地面积增加, 植被状况变好; 2003—2006 年, 荒漠面积增加, 稀疏草地和草地面积减少; 2006—2008 年, 荒漠面积缩减, 稀疏草地和草地面积扩张. 藏北高原东南部地区的林地面积从 2001 年的 $6.09 \times 10^2 \text{ km}^2$ 增加到 2008 年的 $16.07 \times 10^2 \text{ km}^2$; 农牧混合区面积在 2001—2003 年明显减少, 此后保持相对稳定.

2.2 藏北高原地表覆盖类型之间的动态转化

研究期间, 藏北高原各地表覆盖类型面积变化比较简单, 但各类型之间的动态转换情况比较复杂. 由表 2 可以看出, 研究区冰川雪盖、稀疏草地、农牧混合区、湿地面积的变幅较大, 表明这几种地表覆盖的生态系统比较脆弱, 易受外界条件(如全球变暖、放牧、降水年际变化等)影响并发生类型间的转化.

2001—2008 年, 94.7% 的湖泊面积保持不变, 分别有近 1.0% 的湖泊区域转为草地、稀疏草地和荒漠, 0.5% 的草地 (996.3 km^2)、0.3% (367.0 km^2) 的荒漠裸地和少部分稀疏草地被淹没成为湖泊; 53.0% 的冰川雪盖面积未发生变化, 47.0% 的冰雪消融; 由于裸露地表的水分条件良好, 有利于植被生

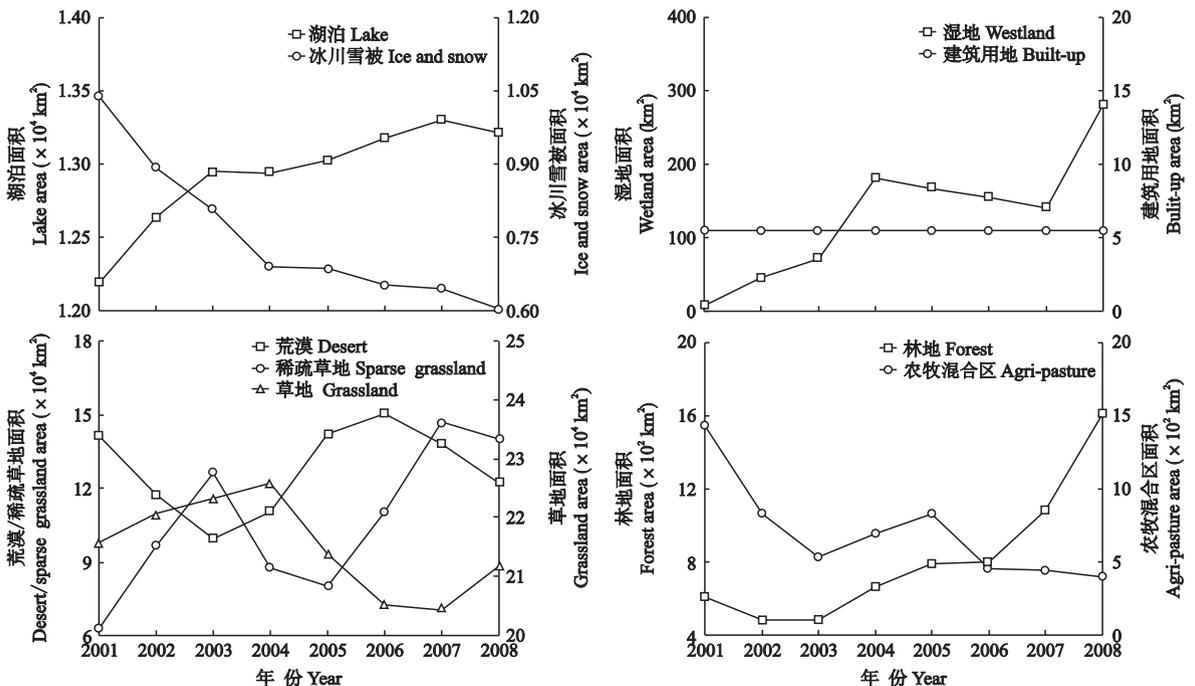


图 2 藏北高原各地表覆盖类型面积的年际变化

Fig. 2 Annual variation of areas of different land cover types in northern Tibetan Plateau.

表 2 2001—2008 年藏北高原各类型地表覆盖面积的转移矩阵

Table 2 Transfer matrix of area of different land cover types in northern Tibetan Plateau from 2001 to 2008 (km²)

| 2008 年地表覆盖类型 Land cover type in 2008 | 2001 年地表覆盖类型 Land cover type in 2001 | | | | | | | | | 合计 Total |
|---|---|---------|-------|---------|----------|--------|-----|-----|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | |
| 1 | 11546.3 | 114.3 | 93.5 | 92.5 | 996.3 | 2.3 | 0.0 | 4.0 | 367.0 | 13216.0 |
| 2 | 8.8 | 5512.5 | 0.3 | 29.8 | 338.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 132.8 | 6022.0 |
| 3 | 222.3 | 73.5 | 283.0 | 141.5 | 666.5 | 1.8 | 0.0 | 0.3 | 218.5 | 1607.3 |
| 4 | 124.5 | 594.0 | 140.8 | 39323.0 | 26342.0 | 285.0 | 0.0 | 1.0 | 21512.5 | 88322.8 |
| 5 | 69.0 | 3210.3 | 72.0 | 48679.5 | 162320.3 | 1020.3 | 0.0 | 1.8 | 18084.3 | 233457.3 |
| 6 | 0.3 | 0.0 | 2.0 | 72.0 | 208.5 | 116.3 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 399.8 |
| 7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 5.5 | 0.0 | 0.0 | 5.5 |
| 8 | 48.3 | 6.5 | 10.8 | 28.0 | 139.5 | 0.8 | 0.0 | 0.8 | 47.5 | 284.5 |
| 9 | 173.3 | 888.5 | 6.5 | 9336.5 | 10098.5 | 2.3 | 0.0 | 0.3 | 101235.3 | 121741.3 |
| 合计 Total | 12192.5 | 10399.5 | 608.8 | 97702.8 | 201109.5 | 1429.0 | 5.5 | 8.0 | 141598.3 | 465053.9 |

1) 湖泊 Lake; 2) 冰川雪盖 Ice and snow; 3) 林地 Forest; 4) 稀疏草地 Sparse grassland; 5) 草地 Grassland; 6) 农牧混合区 Agri-pasture; 7) 建筑用地 Build-up; 8) 湿地 Wetland; 9) 荒漠 Desert.

长,30.9%、5.7%和8.5%的裸露地表分别转为草地、稀疏草地和荒漠;林地面积表现为增长趋势,林地增加部分主要由灌草转化而来,也有少部分的林地退化为稀疏草地和草地;作为一种过渡型植被覆盖类型,稀疏草地与草地和荒漠的相互转化面积较大,49.8%的稀疏草地恢复为草地,9.6%的稀疏草地退化为荒漠,同时,也有13.1%的草地退化为稀疏草地,15.2%的荒漠裸地恢复为稀疏草地;草地覆盖处于相对稳定状态,13.1%、5.0%的草地分别退化为稀疏草地和荒漠;荒漠地区植被生长的自然条件恶劣,71.5%的荒漠保持不变,15.2%、12.8%的荒漠恢复为稀疏草地和草地;农牧混合区的变化主要表现为与草地和稀疏草地之间的转化,大部分农牧混合区荒废为草地和稀疏草地,也有部分草地和稀疏草地被开垦为农牧利用区,农牧混合区面积总体减小;湿地面积迅速增加,主要原因在于湖泊扩张导致其周围草地被部分水淹。

2.3 藏北高原景观结构的变化

2008 年研究区景观斑块数和斑块密度均小于 2001 年(表 3),表明藏北高原地表覆盖破碎度降低,空间异质性减小.研究期间,藏北高原斑块数和斑块密度的变化主要源于冰川雪被、稀疏草地和荒漠的变化(表 4).2001—2008 年,研究区的景观形

表 3 2001—2008 年藏北高原景观结构变化

Table 3 Change of landscape structure in northern Tibetan Plateau between 2001 and 2008

| 年份 Year | 斑块数量 PN | 斑块密度 PD (ind · km ⁻²) | 形状指数 LSI | 聚集度 指数 CONTAG | 多样性 指数 SHDI | 均匀度 指数 SHEI |
|------------|------------|---|-------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| 2001 | 61443 | 14.27 | 1.21 | 57.26 | 1.26 | 0.57 |
| 2008 | 59603 | 13.84 | 1.20 | 59.43 | 1.20 | 0.55 |

状指数由 1.21 减少到 1.20,表明景观形状变化趋于规则化、简单化;研究区景观聚集度指数呈增加趋势,多样性指数和均匀度指数呈减小趋势,表明各地表覆盖类型比例的差异有所增大。

2.4 藏北高原地表覆盖动态与气候变化的关系

2001—2008 年,研究区 7 个气象站点的年均气温呈升高趋势(图 3),升温幅度在 0.56 ~ 1.36 °C · (10 a)⁻¹.东部的索县和比如的升温最显著(表 5),明显高于边多等^[9]的研究结果[1961—2000 年藏北地区的升温幅度为 0.28 °C · (10 a)⁻¹],与姚檀栋等^[4]、汤懋苍等^[12]的研究结论基本一致.气温上升导致藏北高原的高山冰川迅速消融、面积萎缩,高原西北部的临时性冰雪面积有所减少;雪水融化后汇集到谷底或高原湖盆,湖面水位上涨,湖泊面积扩张;同时,湖泊周围的草地被淹,面积减少;冰川融水也时常引发洪涝、崩塌等灾害;湖泊周边被淹没

表 4 2001—2008 年藏北高原各土地类型的景观结构变化
Table 4 Change of landscape structure of different landscape types in northern Tibetan Plateau between 2001 and 2008

| 景观类型 Landscape type | 斑块数 PN | | 斑块密度 PD (ind · km ⁻²) | |
|------------------------|-----------|-------|--------------------------------------|------|
| | 2001 | 2008 | 2001 | 2008 |
| 冰川雪被 Ice and snow | 2347 | 990 | 0.55 | 0.23 |
| 湖泊 Lake | 410 | 533 | 0.10 | 0.12 |
| 林地 Forest | 852 | 2576 | 0.20 | 0.60 |
| 建筑用地 Build-up | 1 | 1 | 0.00 | 0.00 |
| 湿地 Wetland | 29 | 779 | 0.01 | 0.18 |
| 农牧混合区 Agri-pasture | 1635 | 868 | 0.38 | 0.20 |
| 草地 Grassland | 11010 | 13526 | 2.56 | 3.14 |
| 稀疏草地 Sparse grassland | 30082 | 27589 | 6.99 | 6.41 |
| 荒漠 Desert | 15077 | 12741 | 3.50 | 2.96 |

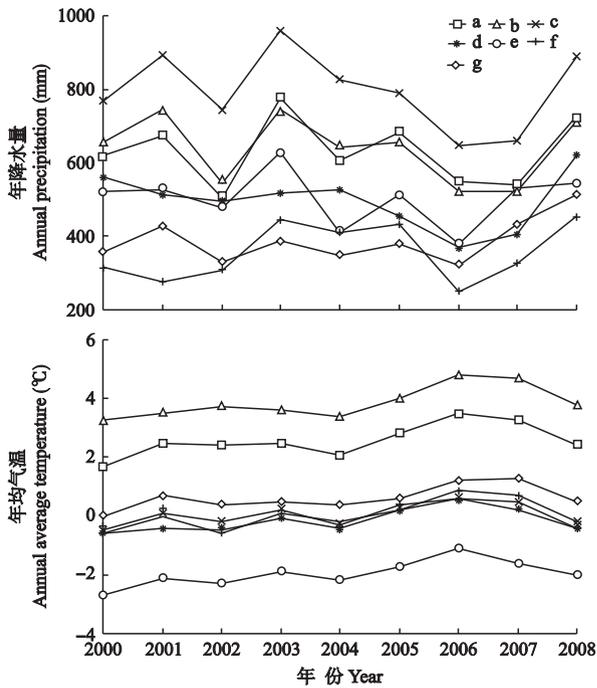


图3 研究区各气象站点年均气温和年降水量的年际变化

Fig. 3 Annual changes of annual average temperature and annual precipitation of weather stations in the study area.

a) 索县 Suoxian; b) 比如 Biru; c) 嘉黎 Jiali; d) 那曲 Naqu; e) 安多 Anduo; f) 班戈 Bange; g) 申扎 Shenzha.

的部分草地形成湿地,导致近年来高原湿地面积有所增加。

藏北地区7个气象站点年降水量的变化趋势不一致,东、中部地区的5个气象站点呈不显著的减少趋势,西部地区的班戈、申扎的年降水量呈增加趋势(图3)。说明藏北高原东部和中部地区呈暖干化趋势,西部地区表现为暖湿化特征。2001—2004年,所有站点的气温相对较低、降水丰富(2003年除外),

表5 2000—2008年藏北地区各气象站点年均气温、年降水量的年变化率

Table 5 Annual change rate of annual average temperature and annual precipitation of weather stations in northern Tibet from 2000 to 2008

| 气象站 Weather station | 年均气温 Annual average temperature | | 年降水量 Annual precipitation | |
|------------------------|--|-------|-------------------------------------|-------|
| | 变化率 Change rate | R^2 | 变化率 Change rate | R^2 |
| | ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$) | | ($\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$) | |
| 索县 Suoxian | 0.13 | 0.40 | -0.57 | 0.00 |
| 比如 Biru | 0.14 | 0.47 | -9.48 | 0.08 |
| 嘉黎 Jiali | 0.06 | 0.14 | -9.42 | 0.06 |
| 那曲 Naqu | 0.09 | 0.33 | -6.48 | 0.05 |
| 安多 Anduo | 0.12 | 0.47 | -3.52 | 0.02 |
| 班戈 Bange | 0.11 | 0.36 | 9.36 | 0.11 |
| 申扎 Shenzha | 0.09 | 0.38 | 10.09 | 0.21 |

为暖湿阶段;2006—2007年,气温升高至峰值,降水减少,为暖干阶段。在暖湿阶段,研究区荒漠裸地面积减少,稀疏草地和草地面积增加;在暖干阶段,荒漠裸地面积增加,稀疏草地面积减少(图2)。

3 讨论

以往的地表覆盖类型变化研究所采用的遥感数据大多基于中高分辨率的 Landsat TM/ETM、SPOT 或 CBERS 等传感器,但由于研究区域宽泛、时间分辨率有限、数据质量不高或传感器停用等因素,这类数据不适于2000年以后的区域性地表覆盖遥感监测。MODIS 地表覆盖分类产品具有时间分辨率高、空间分辨率适中、数据质量高且免费获取等优势,比较适合区域性地表覆盖动态变化研究。

气候变暖导致藏北高原的高山冰川消融加剧、冰川面积萎缩,雪水融化为冰川周围植被生长提供了良好的水分条件,消失的冰川雪被转化为草地和荒漠草地。冰川融水汇集到谷底和湖盆,湖泊水位上涨使周边的草地被淹没,湖泊面积扩张,部分被淹的地区形成湿地。鲁安新等^[10]研究发现,随着升温造成蒸散的增强,青藏高原以降水等为湖水补给的湖泊(如黄河源的一些湖泊)面积萎缩,而以念青唐拉山等高山冰川融水为主要供给的湖泊(如纳木错等)面积则不断增大。叶庆华等^[20]研究结果表明,2000年前玛旁雍错流域面积减少,2000年后湖面面积有所扩张,原因可能是自20世纪80年代中后期开始青藏高原气候由暖干转为暖湿型^[21]。

2000—2008年,研究区植被覆盖状况没有明显变好或恶化趋势,受水热条件的综合影响,表现为年际波动:2001—2004年为暖湿化阶段,荒漠面积减少,稀疏草地和草地面积增加;2006—2007年表现为暖干化特征,荒漠面积增加,稀疏草地面积迅速减小,草地面积相对稳定。与张佳华和郑凌云^[22]、高清竹等^[8]基于两期 Landsat TM 影像对10年尺度的草地覆盖动态变化进行研究相比,利用连续的地表覆盖类型数据更能反映地表覆盖的动态变化过程。

2001—2008年,研究区景观破碎度减小,异质性降低,各种景观类型所占比例的相对差异有所增大,原因可能在于稀疏草地这种过渡型植被类型面积减少,并逐渐向荒漠和草地这两种主体覆被转化。

本研究尚存在几方面的问题:1)由于 MODIS 遥感数据存档时间长度限制(近10年左右),无法在长时间尺度上分析藏北地表覆盖动态变化;2)藏北高原地域宽阔,但仅有7个气象台站,因此不能在区

域尺度上讨论地表覆盖动态与气候变化的关系;3) 利用 MODIS 传感器提供的 500 m 空间分辨率 MCD 数据研究地表覆盖类型的年际变化,相对于 Landsat TM 影像在空间尺度上的差异可能造成研究结论的部分差异,如景观格局的变化等.今后将在已有工作的基础上,结合其他年份的地表覆盖类型数据(如全国 1995 年土地利用类型数据等),着力减少多源数据空间尺度的差异,以在更长时间尺度上研究藏北高原地表覆盖类型的变化.

参考文献

- [1] Houghton JT, Ding Y, Griggs J, *et al.* Observed climate variability and change. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, 2001: 133
- [2] Sheng W-P (盛文萍), Gao Q-Z (高清竹), Li Y-E (李玉娥), *et al.* Characteristic of climate change in Northern Tibet and its impact. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2008, **27**(3): 509–516 (in Chinese)
- [3] Liu XD, Chen BD. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades. *International Journal of Climatology*, 2000, **20**: 1729–1742
- [4] Yao T-D (姚檀栋), Liu X-D (刘晓东), Wang N-L (王宁练). Amplitude of climatic change in Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2000, **45**(1): 98–106 (in Chinese)
- [5] Gansu Grassland Ecological Research Institute (甘肃草原生态研究所), Animal Husbandry Bureau of Naqu Prefecture of Tibet (西藏自治区那曲地区畜牧局). Grassland Resources and Animal Production in the Naqu Region of Tibet. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1991 (in Chinese)
- [6] Yang K (杨凯), Gao Q-Z (高清竹), Li Y-E (李玉娥), *et al.* Spatial distribution of grassland degradation and trend in Northern Tibet. *Advances in Earth Science* (地球科学进展), 2007, **22**(4): 410–416 (in Chinese)
- [7] Zhang J-P (张建平), Liu S-Z (刘淑珍), Zhou L (周麟), *et al.* Soil degradation of main grassland in Naqu area of Tibet. *Journal of Soil Erosion and Water Conservation* (土壤侵蚀与水土保持学报), 1998, **4**(3): 6–11 (in Chinese)
- [8] Gao Q-Z (高清竹), Wan Y-F (万运帆), Li Y-E (李玉娥), *et al.* Landscape structure and changes of grassland in Northern Tibet in the recent ten years. *Chinese Journal of Agrometeorology* (中国农业气象), 2008, **29**(3): 333–337 (in Chinese)
- [9] Bian D (边多), Yang Z-G (杨志刚), Li L (李林), *et al.* The response of lake area change to climate variations in North Tibetan Plateau during last 30 years. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2006, **61**(5): 510–518 (in Chinese)
- [10] Lu A-X (鲁安新), Yao T-D (姚檀栋), Wang L-H (王丽红), *et al.* Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing. *Journal of Glaciology and Geocryology* (冰川冻土), 2005, **27**(6): 783–792 (in Chinese)
- [11] Liu W (刘伟), Gao Y-H (高艳红), Li H-Y (李海英), *et al.* Landuse patterns of Heihe River basin and its impact modeling. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2007, **26**(2): 279–285 (in Chinese)
- [12] Tang M-C (汤懋苍), Liu Y-X (柳艳香), Feng S (冯松). A new millenary warm period may be emerged. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2002, **21**(2): 128–131 (in Chinese)
- [13] Cai Y (蔡英), Li D-L (李栋梁), Tang M-C (汤懋苍), *et al.* Decadal temperature changes over Qinghai-Xizang Plateau in recent 50 years. *Plateau Meteorology* (高原气象), 2003, **22**(5): 464–470 (in Chinese)
- [14] Wei Z-G (韦志刚), Huang R-H (黄荣辉), Dong W-J (董文杰). Interannual and interdecadal variations of air temperature and precipitation over the Tibetan Plateau. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (大气科学), 2003, **27**(2): 157–170 (in Chinese)
- [15] Fridel MA, McIver DK, Hodges JCF, *et al.* Global land cover mapping from MODIS: Algorithms and early results. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **83**: 287–302
- [16] Heiskanen J. Evaluation of global land cover data sets over the tundra-taiga transition zone in northernmost Finland. *International Journal of Remote Sensing*, 2008, **29**: 3727–3751
- [17] Liu H-Y (刘惠英). Studies of Arid Land Classification and Lake Monitoring Based on MODIS Remote Data. Master Thesis. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2004 (in Chinese)
- [18] Xia W-T (夏文韬), Wang Y (王莺), Feng Q-S (冯琦胜), *et al.* Accuracy assessment of MODIS land cover product of Gannan Prefecture. *Pratacultural Science* (草业科学), 2010, **27**(9): 11–18 (in Chinese)
- [19] Liu S-Z (刘淑珍), Zhou L (周麟), Qiu C-S (仇崇善), *et al.* Studies on Grassland Degradation and Desertification of Naqu Prefecture in Tibet Autonomous Region. Lasa: Tibet People's Press, 1999 (in Chinese)
- [20] Ye Q-H (叶庆华), Yao T-D (姚檀栋), Zheng H-X (郑红星), *et al.* Glacier and lake co-variations and their responses to climate change in the Mapam Yumco Basin on Tibet. *Geographical Research* (地理研究), 2008, **27**(5): 1178–1189 (in Chinese)
- [21] Niu T (牛涛), Liu H-L (刘洪利), Song Y (宋燕), *et al.* Study on decade change of climate shift from warm-dry period to warm-wet period over Tibetan Plateau. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (应用气象学报), 2005, **16**(6): 763–771 (in Chinese)
- [22] Zhang J-H (张佳华), Zheng L-Y (郑凌云). Dynamic changes and reason analysis of grassland and unused (unexploited or unwrought) land in Naqu of northern Tibet. *Journal of Mountain Research* (山地学报), 2005, **23**(6): 672–677 (in Chinese)

作者简介 宋春桥,男,1986年生,硕士研究生.主要从事生态环境遥感以及遥感与GIS应用研究,发表论文10余篇.
E-mail: chunqiao_song@163.com

责任编辑 杨弘