

额尔齐斯河流域 MOD 系统变化及其对 气候与人类活动的响应

李佳秀^{1,2,3}, 陈亚宁², 刘志辉¹, 李 稚²

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2. 中国科学院 新疆生态与地理研究所
荒漠与绿洲生态国家重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要:运用额尔齐斯河流域内 3 个典型区域内的遥感影像,并结合气候数据,分析探究了研究区内 MOD 系统的变化特征及其对气候变化和人类活动的响应。结果表明:(1) 研究区气候整体变得暖湿,水热状况趋于良性发展,但温度和降水并不协同变化,各个子系统之间存在很大差异。(2) 受人类活动的影响,1999 年是研究区景观格局的转折点,景观结构、斑块形状和数量都在一定程度上有所增加。(3) 研究区内 MOD 各个子系统都有其明显特征:山地系统受人类活动影响较小,受气候变化的影响较大,1979 年以来,水体和裸地面积略有增加,自然植被面积有所减少,而耕地面积先增加后减少;绿洲系统受气候和人类活动共同的影响较大,天然植被面积自 1999 年后降低,而耕地面积大幅增加,人类耕作对该区土地利用变化的影响十分明显;荒漠系统增湿率在 3 个区域最高,但结构单一,区内盐碱化较严重,受绿洲扩张影响,荒地面积自 1979 年以来显著减少。

关键词:MOD 系统; 气候变化; 景观格局

中图分类号:P463;TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)02-0250-07

Variation of Mountain-Oasis-Desert (MOD) System and Its Response to Climate Change and Human Activities in Irtysh River Basin

LI Jiaxiu^{1,2,3}, CHEN Yaning², LIU Zhihui¹, LI Zhi²

(1. College of Resource and Environment Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Remote sensing images of 3 typical regions in the Irtysh River basin and the related weather data were used to investigate the variation characteristic of mountain-oasis-desert (MOD) system and its response to climate change and human activities. The results show that: (1) the whole study area has becoming warm and humid, and the water-heat conditions tend to be more healthy development, but the changes of temperature and precipitation are not synergy, and great differences exist among subsystems; (2) affected by human activities, the year of 1999 was the turning point of landscape pattern in the study area, landscape structure, patch shape and quantity increased to some extent in this year; (3) each subsystem has distinctive characteristics: the mountain subsystem is less affected by human activities, mainly affected by climate change, after 1979, the water and bare land areas slight increased, nature vegetation decreased and cultivated land increased first and then decreased; the oasis subsystem is both affected by climate and human activities greatly, the nature vegetation area has decreased since 1999, while cultivated land area has increased greatly, which showed that human cultivation obviously changed the land type in this region; the desert subsystem has the highest humidifying rate, but its structure is simple, salinization is severe, wasteland area has shrunk remarkably since 1979 due to the influence of oasis expansion.

Keywords: MOD system; climate change; landscape pattern

IPCC 第 5 次评估报告^[1]明确指出,近百年来全球气温的显著上升,物质能量循环的加快已对不同尺度的大气圈、水圈及生物圈产生了明显的影响,由此引发的资源和环境问题严重威胁人类生存和区域发展。中亚干旱与半干旱区属于典型的温带大陆性气候,该区深处大陆腹地,广泛发育山脉和盆地,其独特的气候及自然地貌形成了典型的山地—绿洲—荒漠(MOD)耦合系统。其中,水热条件是系统中植被生长发育的主要限制因子,影响着植物种群组成与分布^[2]。水分是联系山地—绿洲—荒漠系统最直接的纽带,山地向盆地输送了大量的地表水和地下水,决定了天然绿洲的规模及范围,也影响着人工绿洲的发展潜力,绿洲边缘和外围环绕着荒漠。山地、绿洲、荒漠镶嵌共生,相互作用,共同支撑着干旱区的完整体系^[3]。

中亚干旱与半干旱区对全球气候变化响应敏感,特别是额尔齐斯河流域被国内外学者认为是地球上生态系统最易受影响乃至最为濒危的区域之一^[4],在当前气候与环境条件下,其社会经济系统与生态系统的协调发展已成为社会各界十分关注的问题。目前针对该区的研究主要着眼于特定因素的深入分析,如水质状况^[4]、水资源开发和利用^[5]、降水和温度变化特征^[6]、对水资源的影响^[7]、土地利用变化^[8-9]和碳循环^[10]等,也有学者探讨了系统结构特征和相关性质^[11],但未涉及系统的动态变化及影响机制探讨。本文旨在通过研究流域内上、中和下游区不同 MOD 子系统的变化及其对气候变化与人类活动的响应,揭示自然和人为环境变化下系统各个组分的变化特征和发展规律,为科学认识全球变化对中亚干旱半干旱区不同区域空间差异性影响提供依据。

1 研究区概况

额尔齐斯河发源于中国新疆富蕴县阿尔泰山南坡,沿阿尔泰山南麓流向西北,进入哈萨克斯坦国,注入斋桑泊,后于哈萨克斯坦东北部继续流向西北,进入俄罗斯后汇入鄂毕河,最终汇入北冰洋,为鄂毕河的最大支流。流域全长 4 248 km,面积 164 万 km²。本文的研究区是中哈两国境内的额尔齐斯河流域,该流域自东南向西北延伸,位于 73°22′38″—85°7′53″E, 46°48′23″—53°11′19″N。其中,中国境内河长 633 km,流域面积为 4.53 万 km²,河川径流量 85 亿 m³^[7];哈萨克斯坦境内河长 1 698 km,流域面积为 91.8 万 km²,河川径流量 255 亿 m³^[5]。该区具有明显的温带荒漠气候特征,受西风带控制,水汽主要来源于大西洋和北冰洋,年平均降雨量 311 mm,蒸发量相对较小。年平均温度 3.3℃,夏季温和干燥,冬

季寒冷多雪,春秋季节短暂而不明显。地势整体呈东南高,西北低。

研究区属于典型的 MOD 系统,分别对应流域的上、中、下游区域。阿尔泰山脉发育了额尔齐斯河并注入斋桑谷地,荒漠、草原和森林呈带状分布于山地不同海拔高度上。河流出口发育冲积扇平原,外围是西伯利亚低地,植被类型丰富多样,平原植被稀疏。人工绿洲主要分布在河流的高、低阶地上^[12]。河流西南岸的平原及丘陵则分布着广泛的温带荒漠。

水分的演变及转化过程,直接影响着系统的稳定性。地貌类型决定系统的基础和框架,而气候的差异和变化则在地貌差异的基础上进一步影响了水文特征和植被的类型^[11],区域内的人类活动显著改变了地表反射率以及水和能量的循环,对区域及全球尺度的气候系统产生影响。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据资料

气象资料来源于美国 NCDC(<http://www.ncdc.noaa.gov>)及中国气象科学数据共享网(<http://cdc.cma.gov.cn>)。选取流域内信息较为完整的 16 个站点(哈国 11 个,中国 5 个)1970—2011 年的数据,其中哈国降水数据 2000—2011 年部分缺测,由周边临近站点插值补缺完成。站点分布于流域各个区域及不同海拔高度上,取算术平均值,可代表流域整体实际水平。遥感影像资料选取 Landsat 1978—1979 年、1989 年、1999 年和 2013 年共 4 期,7—10 月份,地物清晰、云量小于 10% 的影像。对 4 期遥感影像分别进行辐射定标、大气校正等预处理过程,采用监督分类的 SVM(支持向量机)方法对影像进行监督分类,以哈萨克斯坦国 1:500 万生态环境数据作为基础,运用 ENVI 软件进行土地利用/覆被类型的分类与制图。集合《中国土地分类系统》,将图像分为耕地、林地、盐渍地等 7 类。

2.2 研究方法

2.2.1 非参数 Daniel 检验 该方法是建立在 Spearman 秩相关系数基础之上,检验非平稳数据序列观测值与时间是否存在着同时增加或减少的趋势,同时确定其显著水平。当 Daniel 检验的秩相关系数的显著水平 p 值小于等于 0.05 时,表明时间序列数据有显著上升或下降趋势,否则无显著趋势^[13]。

2.2.2 DFA 去趋势波动分析法 用于非平稳时间序列中的长程相关分析并对未来趋势做出预测。具体方法详见参考文献[14-15]。分析时间节点 S 与 $F(S)$ 的幂律相关性,即:

$$\ln F(S)=a\ln S+b \tag{1}$$

式中: a 为 DFA 指数,不同的指数值反映了不同的时间过程。当 $a=0.5$,序列是随机序列。当 $0<a<0.5$,序列有短程相关性,或反持续性。在前一个期间与在后一个期间存在相反的趋势。 a 越接近 0,反持续性趋势越强。当 $0.5<a<1$,序列有长期相关性。在前一个期间与在后一个期间存在相同的趋势,值越接近 1,持续趋势越强。当 $a=1$,此序列是一个具有 $1/f$ 谱的非平稳随机

过程。当 $a\geqslant 1.5$ 序列是布朗噪声序列。

2.2.3 景观指数计算 利用 Fragstats 软件,从景观类型与斑块水平的两个角度计算景观指数,包括斑块数量、斑块形状指数、斑块密度、Shannon 多样性指数和 Shannon 均匀度指数。各个指数所代表的生态学意义及计算方法参见文献[16]。景观指数能够定量地反映土地利用的结构与空间配置,是景观格局的高度浓缩。各景观指数的定义及生态学意义如表 1 所示。

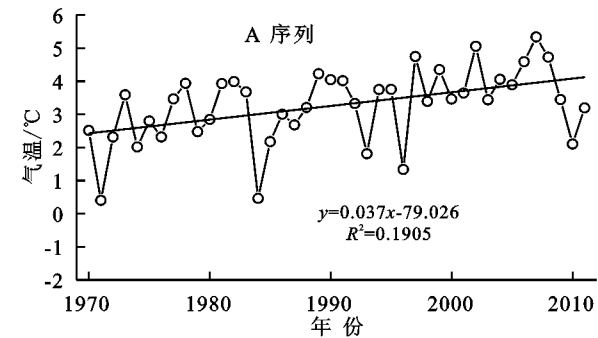
表 1 景观指数的方程及生态学意义

景观指数	公式	生态意义
斑块数量(NP)	$NP=n$	反映景观的空间格局,用来描述整个景观的异质性
斑块密度(PD)	$PD=\frac{N}{A}(10000)(100)$	描述单位面积上的斑块数,有利于不同大小景观间的比较
斑块形状指数(PSI)	$PSI=\frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$	计算某一斑块形状与相同面积的圆之间的偏离程度来测量形状的复杂程度
Shannon 多样性指数(SHDI)	$SHDI=-\sum_{i=1}^m(P_i\ln P_i)$	反映景观异质性,特别对景观中各拼块类型非均衡分布状况较为敏感,即强调稀有拼块类型对信息的贡献
Shannon 均匀度指数(SHEI)	$SHEI=\frac{-\sum_{i=1}^m(P_i\ln P_i)}{\ln m}$	不同类型斑块的面积分布均匀时得到最大的均匀度

3 结果与分析

3.1 流域气候变化特征

3.1.1 气温与降水的变化趋势 额尔齐斯河流域多年平均温度为 3.26℃,从图 1A 中可以看出,研究区近 40 a 的平均温度整体呈上升趋势,增温速率为



0.37℃/10 a,且通过了 Daniel 显著性检验($p=0.0049$),这与全球^[1]、中亚^[17]及新疆北部^[18]气温不断升高的变化趋势一致。研究区气温在 20 世纪 90 年代中期前主要呈负距平,而之后呈正距平,特别是 2000 年以后升温幅度明显,是近 40 a 升温幅度最大且持续时间最长的一次升温(图 1B)。

0.37℃/10 a,且通过了 Daniel 显著性检验($p=0.0049$),这与全球^[1]、中亚^[17]及新疆北部^[18]气温不断升高的变化趋势一致。研究区气温在 20 世纪 90 年代中期前主要呈负距平,而之后呈正距平,特别是 2000 年以后升温幅度明显,是近 40 a 升温幅度最大且持续时间最长的一次升温(图 1B)。

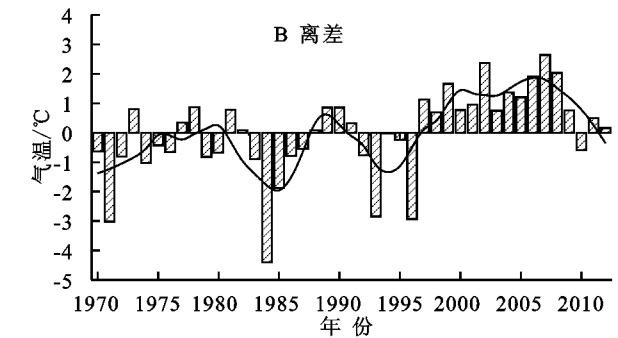


图 1 流域温度序列及离差

综上所述,研究区近 40 年气温和降水均呈波动上升趋势,水热状况趋于改善。温度上升趋势显著($p=0.0049$),降水增加趋势不显著($p=0.0663$)。从时间尺度看,降水变化滞后于温度 4~5 年。

3.1.2 气温与降水未来变化趋势 采用 DFA 法分析上游区和全流域气温、降水的未来变化趋势,对比子区域与整个流域未来气候变化的差异。研究发现,上游区气温和降水的 DFA 值分别为 0.588,0.730,均介于 0.5~1(图 3A—3B)。表明上游区未来气温和降水都将继续保持增长的趋势,而且温度的持续上升相对于降水具有更高的可靠性。

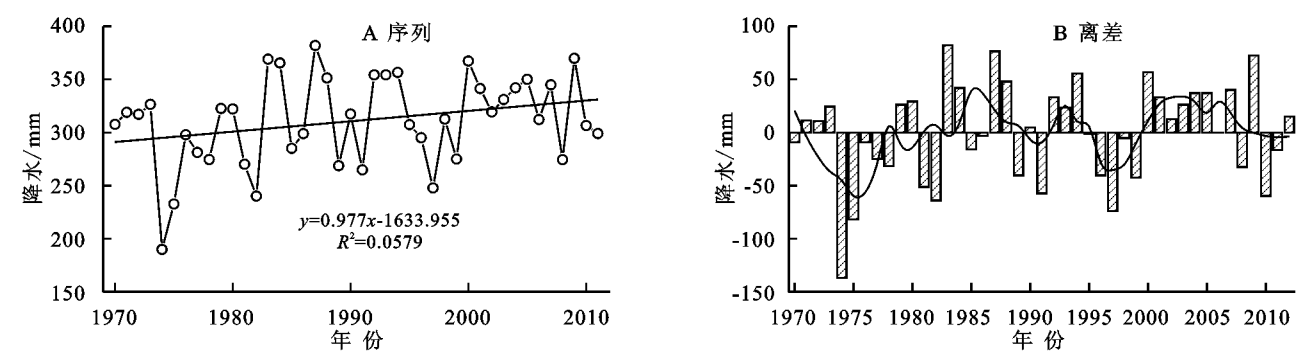


图 2 流域降水序列及离差

对于流域整体,虽然气温和降水呈多年增长趋势($0.37^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$, $9.77\text{ mm}/10\text{ a}$),但其 DFA 值分别为 1.537, 1.786, 均大于 1.5, 属布朗振荡, 无法判断整个流域未来气温和降水变化的可能方向(图 3C—3D)。

这种上游区未来增长趋势明确但全流域不明确的现象是由于上游区地形及地物结构相对单一, 而全流域环境复杂造成的。因此有必要分子系统对研究区气候与生态的动态变化作深入研究。

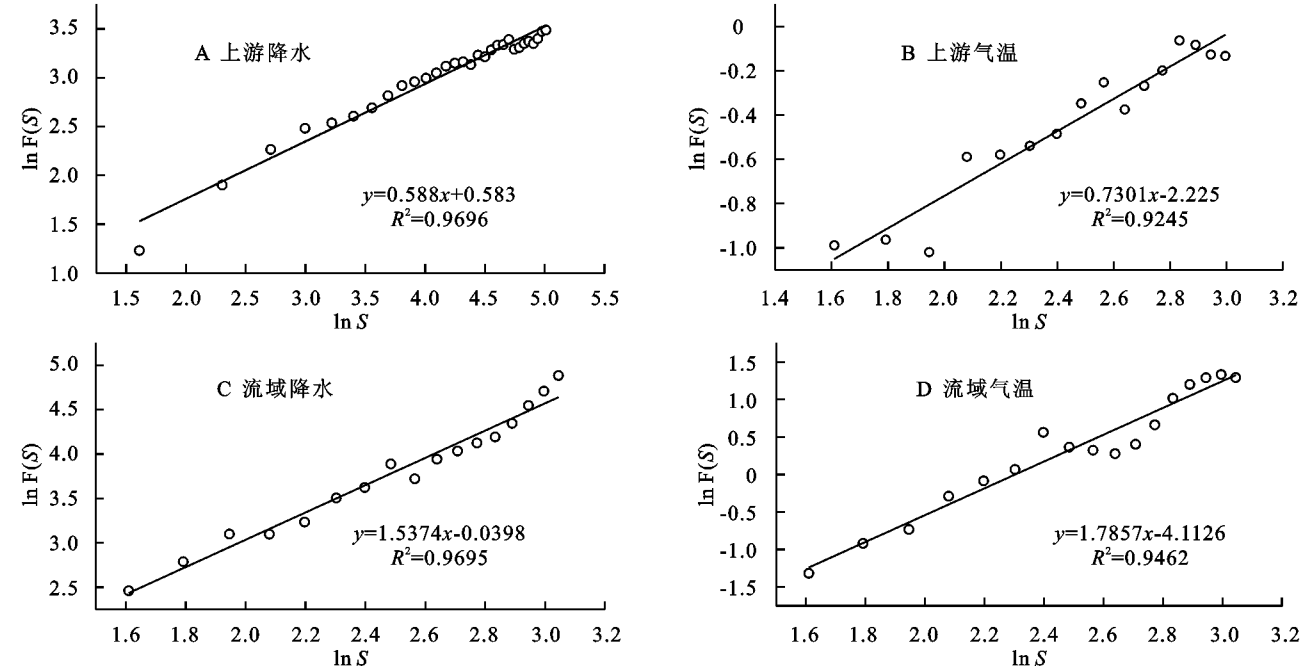


图 3 上游区域和整个流域 DFA 对比分析

3.2 MOD 系统动态变化分析

3.2.1 MOD 子系统划分 水热条件对 MOD 各系统具有限制作用, 绿洲与荒漠的相互演变过程就是以水热为代表的环境条件逐步改善的过程^[22]。在不考虑水文因子的情况下, 对整个流域多年平均温度和降水进行全区域插值, 分别划分 3 级, 并将各区域值累积相乘后共构成 6 级, 得到整个研究区的水热分级图, 值越高的区域指示水热状况越好。在分级基础上, 再沿着干流从上游到下游选取 3 块有代表性的子区域 A(斋桑泊), B(塞米伊)和 C(巴普洛达尔), 分别代表山地系统、绿洲系统和荒漠系统(表 2)。结合 3 个子区域近 40 a 内的气候和遥感影像数据, 分析研究 MOD 系统各组分变化特征及其与气候变化和人类活动之间的关系。

表 2 目标子区域信息

子区域	流域位置	水热状况	地形特点	隶属系统
斋桑泊(A)	上游	一般	雨影区山地及盆地	山地系统
塞米伊(B)	中游	良好	山前迎风坡冲积平原	绿洲系统
巴普洛达尔(C)	下游	一般	平原及低矮丘陵	荒漠系统

3.2.2 MOD 子系统动态变化分析 A 区作为典型的山地系统, 分析得出, A 区年平均温度为 1.67°C , 年降水量为 292.5 mm , 近 40 a 线性增温和增湿率分别为 $0.39^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 和 $4.8\text{ mm}/10\text{ a}$ 。区域内, 由于斋桑泊的存在, 水体充足, 达全区面积的 15%; 但裸地面积较大, 达 30% 以上, 广泛分布于湖边与山地; 绿地(耕地和自然植被)主要分布于支流的阶地及湖岸高地, 面积约占全区面积的 20%, 自 1979—1999 年绿地面积有所增加, 而 1999 年后有所减少; 裸地面积

由 35.27% 上升到 47.19% 且持续上升;水体面积稳步小幅上升,从 14.6% 增加到了 16.7% (图 4A)。

B 区作为典型的绿洲系统,年平均温度为 4.08℃,线性增温率为 0.16℃/10 a,年降水量为 309.5 mm,无明显升降趋势。山前冲积平原水热充足,该区域迎风坡山地有大量的耕地和天然植被,植被覆盖度高达 40%~50%。其中,针叶林集中于额尔齐斯河北岸的西伯利亚低地,荒地和裸地主要分布在河流南部的哈萨克丘陵。从图像分析也可知荒地和裸地占该区的 20% 左右。1979—1989 年,水体面积由 1979 年的 0.8% 增加到了 1989 年的 1.5%,绿地面积也增加了 6.9%。1989—1999 年沼泽和裸地面积明显减少,分别减小了 5.3% 和 3%,而荒地面积却增加了 7.7%。1999—2013 年荒地和裸地扩大,达到了全区面积的 46.7%,而绿地面积减小了 14.3% (图 4B)。

C 区作为典型的荒漠系统,年平均温度为 2.87℃,线性增温率为 0.15℃/10 a,年降水量为 326.8 mm,线性增湿率 6.14 mm/10 a。该区是径流耗散区,水热状况一般,多年植被覆盖度基本维持在 50% 左右。区域南部作为过渡缓冲带的荒漠面积较大,达到了 20% 左右。区域内有许多小型的水域,部分已干涸或盐碱化。1979—1989 年绿地面积基本维持不变,裸地以及盐碱地面积增加,增幅分别为 0.41% 和 3.46%。1989—1999 年大量荒地退化成裸地,荒地随之减少了 18.8%,其他地物面积几乎不变;1999—2013 年绿地面积扩大了 10.99%,荒地面积,沼泽和水体都有小幅的减少(图 4C)。

3.2.3 景观格局动态变化分析 A,B,C 这 3 个子区域中,B 和 C 区受人类活动的影响较大,因此其景

观格局的变化较大。利用 Fragstats 软件,从景观类型与斑块水平两个角度计算景观指数。

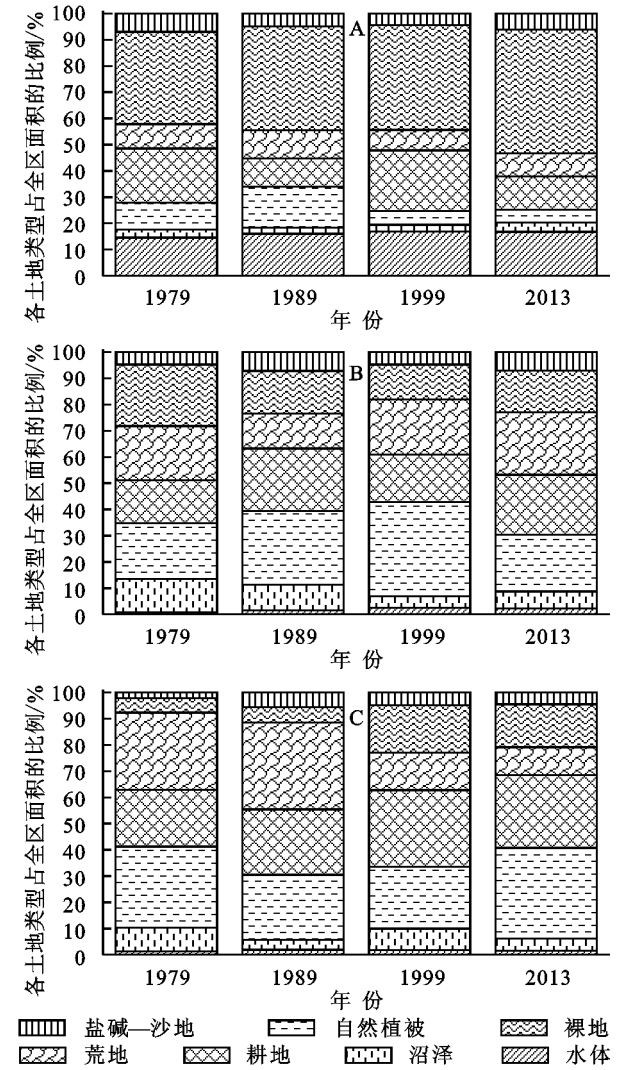


图 4 1979—2013 年 A、B 和 C 区土地利用类型变化

表 3 1979—2013 年 B 和 C 区景观指数特征值

景观指标	B 区各年份特征值				C 区各年份特征值			
	1979 年	1989 年	1999 年	2013 年	1979 年	1989 年	1999 年	2013 年
斑块数量	274009	790723	1099742	532443	302628	620272	1155629	574061
斑块密度	22.55	65.07	90.50	43.81	13.97	28.62	53.33	26.49
斑块形状指数	342.51	502.90	677.43	393.06	298.49	357.92	543.08	365.68
Shannon 多样性指数	1.81	1.82	1.73	1.83	1.69	1.71	1.79	1.72
Shannon 均匀度指数	0.87	0.87	0.83	0.88	0.81	0.82	0.86	0.83

从表 3 中可知,B 区和 C 区的斑块数量从 1979—1999 年持续增加,1999—2013 年略有减少,可见区域破碎性增加。B 区景观 Shannon 多样性指数和 Shannon 均匀度指数先降低再升高,说明该区域的景观异质性程度呈现先下降再上升的趋势,景观类型趋于多样化发展。C 区景观 Shannon 多样性指数和 Shannon 均匀度指数则先上升再下降,说明该区域景观异质性程度呈现先上升再下降的趋势,景观类型越丰富,景观所含的信息量和信息的不定性越大。

从年份对比可以看出 1999 年 B 区和 C 区景观形状结构最为复杂。而 1999 年以后,斑块形状指数减小,斑块复杂性降低,说明区域的景观结构与形状区域规则化、聚集化。

3.2.4 MOD 系统对气候变化和人类活动的响应 由景观变化分析可知 1999 年前后各子系统都发生了较其他时期更为明显的变化。区分 MOD 各子系统,进一步讨论其受气候变化和人类活动的影响。

(1) 山地系统。由流域气候的暖湿化趋势以及

A 区近年水体和沼泽面积的变化(图 4 和表 3)可以推断,地表水资源得到了暂时性增加。主要是因为气温升高导致的高山冰雪融水增加^[17]。A 区气温和降水的增长率分别为 0.39℃/10 a 和 4.8 mm/10 a,而绿地面积与平均温度和降水的相关系数分别为 0.53 和 0.98,气温和降水的增加使得 A 区绿地面积在 1979—1999 年增加,但 2013 年有所减少。人类活动使得该区自然植被面积有所减少,而耕地面积增加;不可用地面积(裸地和盐碱—沙地)与平均温度和降水的相关系数分别为 0.64 和 -0.84,不可用地面积逐年增加。由进一步的遥感解译可知,区域内自然植被主要是山地林带,1989 年林地面积的增加,一定程度上抑制了不可用地的增加,1999—2013 年,随着林地面积大幅减少,不可用地的面积增加迅速(表 4)。

表 4 A 区域地物景观百分比 %				
类型	地物百分比			
	1979 年	1989 年	1999 年	2013 年
水体	14.56	16.00	16.90	16.75
沼泽	2.98	2.39	2.57	3.51
自然植被	10.32	15.53	5.18	4.91
耕地	20.69	10.82	23.13	12.67
荒地	9.24	10.77	7.81	8.87
裸地	35.27	39.61	39.91	47.19
盐碱—沙地	6.96	4.89	4.50	6.09

(2) 绿洲系统。1979—1989 年,随着 B 区水库的建立,水体面积显著增加,至 1999 年后维持相对稳定的规模;沼泽面积有一定的起伏,总体呈下降趋势;绿地面积同平均温度和降水的相关性都不高,分别为 0.48 和 -0.36。伴随着区域水体面积的显著增加,引水灌溉和开垦力度加大,耕地面积随之增加。而自然植被受限于气候和水文条件,1999—2013 年退缩明显。荒地面积自 1989 年后持续增加。不可用地面积与平均温度的相关性较好,相关系数为 -0.80,与降水的相关性较差,相关系数为 -0.1。1979—1999 年受绿地面积扩大和气温上升的影响,不可用地面积逐渐缩减。相应的,1999—2013 年绿地规模退缩,不可用地面积扩大(表 5)。

表 5 B 区域地位景观百分比 %				
类型	地物百分比			
	1979 年	1989 年	1999 年	2013 年
水体	0.76	1.54	2.50	2.27
沼泽	12.74	9.70	4.38	6.49
自然植被	21.25	28.13	35.95	21.64
耕地	16.46	23.89	18.12	22.86
荒地	20.60	13.24	20.98	23.81
裸地	23.41	16.34	13.35	15.81
盐碱—沙地	4.78	7.17	4.72	7.12

(3) 荒漠系统。1979—1989 年 C 区水体面积有所增加,之后小幅减少。绿地主要分布在干流附近及河流北岸,同平均温度和降水的相关系数分别为 0.65 和 0.95,与降水的相关性较大。1979—1989 年植被面积变化不大,主要是其他地向耕地的转化;1989—2013 年随着人类活动影响,水热状况的改善,耕地和自然植被面积扩大。不可用地面积与平均温度和降水的相关系数分别为 0.88 和 0.61,与温度的相关性较大。区域内温度升高,且伴随着绿地向外扩张,导致 1989 年以来荒地面积减少,但不可用地面积增加(表 6)。

表 6 C 区域地物景观百分比 %				
类型	地物百分比			
	1979 年	1989 年	1999 年	2013 年
水体	1.28	1.91	1.77	1.45
沼泽	8.97	3.80	8.20	4.68
自然植被	31.01	24.80	23.61	34.61
耕地	21.61	24.89	29.20	27.77
荒地	29.49	33.09	14.31	10.61
裸地	5.46	5.87	18.00	16.39
盐碱—沙地	2.17	5.63	4.91	4.50

4 讨论

山地高海拔冰川和积雪融水是额尔齐斯河的主要补给源,气温升高使得冰雪融水增多,伴随流域内降水量的增加,使得流域内植被覆盖面积增加^[23]。但流域内由于人为开发,生态环境进一步变得复杂,对整个生态系统的影响也更加明显。山地系统中,非农业用地主要为山区森林,山区森林面积的增加有助于抑制不可用地面积的增加。可见,森林对稳定系统组分和调节气候和水资源供给是非常重要的。

绿洲作为整个 MOD 系统中最为活跃的组分,水热状况较为良好,同时是人类活动的中心,受到自然和人为因素的共同影响与制约。绿洲内温度、降水和植被覆盖变化导致蒸散发率、反照率、地表粗糙率等综合效应的不同,也会对自身起到调节作用^[24]。同时人类生产生活方式的变化导致绿洲内景观变化更为剧烈,生态环境的脆弱性程度加大^[25]。

荒漠作为绿洲系统外围的屏障和储备^[26],缓冲了干旱半干旱区恶劣气候对于绿洲的侵害,为绿洲的扩展和演替提供了基础。除气候变化对其造成的长时间尺度的影响外,目前荒漠系统受人类的干预也变得越来越,生态环境变得十分敏感。人类活动的持续增强,植被覆盖面积将进一步减少而裸地面积增加,最终导致更大面积的盐碱化和沙化,使得区域的脆弱性增加^[27],并减弱未来农业生产和生态的适应性。例如 20 世纪著名的威海危机^[28]和塔里木河生态水文危机^[29]被认为是由

于过多的人类活动造成的。

本文仅对 MOD 系统的土地类型进行了基本的分类分析,但人工绿地、森林、灌木和草地没有被进一步分类。因此,人类和自然因素对 MOD 系统的影响需要进一步更精确的分类和定量分析。

5 结 论

(1) 研究区整体变得暖湿,水热状况趋于良性发展,但温度和降水并不协同变化,加上地形地貌的差异,各个子系统对气候变化和人类活动的响应存在差异。1999 年是研究区景观格局的转折点,景观结构、形状和数量都在一定程度上有所增加,这一转变与人类活动的影响密不可分。

(2) A 区山地系统也受到人类活动的影响,但影响较小。其年均气温最小,线性升温率却最高。近 40 a 来,在气候变暖的影响下,水体面积小幅增长,植被面积先增加后减少,主要表现为耕地面积挤占自然植被面积而使得自然植被面积的减少。裸地面积在 1999 年前几乎无变化而之后有所增加。研究区土地利用类型向不可利用地类转换的面积越来越大。

(3) B 区绿洲系统地处山前冲击平原,受气候和人类的共同影响,近 40 a 来该区气温有所升高,但降水量无明显变化。该区植被覆盖度高,但天然植被面积自 1999 年后降低,而耕地面积大幅增加,可知人类耕作活动对这一地区土地利用改变十分明显。

(4) C 区增湿率在 3 个区域最高,多年植被覆盖度基本维持在 50% 左右,但结构单一,区内盐碱化较严重,受绿洲扩张的影响,荒地面积自 1979 年以来显著减小。

参考文献:

- [1] Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. The physical science basis: contribution of working group to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]//IPCC. IPCC 2013. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Evans D D, Thames J L. Water in desert ecosystems[J]. *Journal of Range Management*, 1981,35(4):543.
- [3] Baird A, Wilby R. Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments[J]. *Journal of Ecology*, 1999,88(6):1095-1096.
- [4] Hrkal Z, Gadalia A, Rigaudiere P. Will the river Irtysh survive the year 2030? Impact of long-term unsuitable land use and water management of the upper stretch of the river catchment(North Kazakhstan)[J]. *Environmental Geology*, 2006,50(5):717-723.
- [5] 龙爱华,邓铭江,李湘权,等. 哈萨克斯坦水资源及其开发利用[J]. *地球科学进展*, 2010,25(12):1357-1366.
- [6] 李捷,夏自强,郭利丹,等. 额尔齐斯河流域气候特征及变化趋势分析[J]. *河海大学学报:自然科学版*, 2008,36(3):311-315.
- [7] 雷雨,龙爱华,邓铭江,等. 1926—2009 年额尔齐斯河流域中游地区气候变化及其对水资源的影响分析[J]. *冰川冻土*, 2012,34(4):912-919.
- [8] Beurs D, Kirsten M, Henebry G M. Land surface phenology, climatic variation, and institutional change: analyzing agricultural land cover change in Kazakhstan[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004,89(4):497-509.
- [9] 沈金祥,陈曦,杨辽,等. 额尔齐斯河—斋桑湖流域近 20 年来土地利用/土地覆被时空演变[J]. *干旱区地理*, 2010,33(2):189-195.
- [10] Chuluun T, Ojima D. Land use change and carbon cycle in arid and semi-arid lands of East and Central Asia[J]. *Science in China Series C: Life Sciences-English Edition*, 2002,45(S1):48-54.
- [11] 王让会,张慧芝,赵振勇,等. MODS 耦合关系的界面过程及其特征[J]. *干旱区地理*, 2004,27(3):388-392.
- [12] Jing X H. Landscape pattern and fragmentation in Beitun of Irtysh River Basin, Xinjiang[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2008,44(3):21-28.
- [13] Wilks D S. Statistical methods in the atmospheric sciences[M]. Oxford: Academic Press, 2011.
- [14] Peng C K, Havlin S, Stanley H E, et al. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series[J]. *Chaos An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 1995,5(1):82-87.
- [15] 高沈瞳,徐长春. 额尔齐斯河流域上游地区近 50 a 来气温和降水变化的 DFA 分析[J]. *冰川冻土*, 2014,36(3):706-716.
- [16] 余新晓. 景观生态学[M]. 北京:高等教育出版社,2006.
- [17] Chen F, Wang J, Jin L, et al. Rapid warming in mid-latitude central Asia for the past 100 years[J]. *Frontiers of Earth Science*, 2009,3(1):42-50.
- [18] 马柱国,符淙斌,任小波,等. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系[J]. *地理学报*, 2003,58(9):11-19.
- [19] Stulina G, Eshchanov O. Climate change impacts on hydrology and environment in the Pre-Aral region[J]. *Quaternary International*, 2013,311(454):87-96.
- [20] Wang S J, Zhang M J, Sun M P, et al. Changes in precipitation extremes in alpine areas of the Chinese Tianshan Mountains, central Asia, 1961—2011[J]. *Quaternary International*, 2013,311:97-107.

- [5] Hersperger A M, Langhamer D, Dalang T. Inventing human-made objects: A step towards better understanding land use for multifunctional planning in a peri-urban Swiss landscape [J]. *Landscape & Urban Planning*, 2012, 105(3): 307-314.
- [6] 樊杰, 周侃, 陈东. 生态文明建设中优化国土空间开发格局的经济地理学研究创新与应用实践[J]. *经济地理*, 2013, 33(1): 1-8.
- [7] 杨伟民, 袁嘉禄, 张耕田, 等. 实施主体功能区战略, 构建高效、协调、可持续的美好家园: 主体功能区战略研究总报告[J]. *管理世界*, 2012(10): 1-17.
- [8] 边振兴, 程雪峰, 于森, 等. 沈抚连接带“三生”空间的功能均衡性分析[J]. *中国农业资源与区划*, 2016, 37(12): 84-92.
- [9] 念沛豪, 蔡玉梅, 张文新, 等. 面向综合区划的国土空间地理实体分类与功能识别[J]. *经济地理*, 2014, 34(12): 7-14.
- [10] 张红旗, 许尔琪, 朱会议. 中国“三生用地”分类及其空间格局[J]. *资源科学*, 2015, 37(7): 1332-1338.
- [11] 刘彦随, 刘玉, 陈玉福. 中国地域多功能性评价及其决策机制[J]. *地理学报*, 2011, 66(10): 1379-1389.
- [12] 李广东, 方创琳. 城市生态—生产—生活空间功能定量识别与分析[J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 49-65.
- [13] 洪惠坤. “三生”功能协调下的重庆市乡村空间优化研究[D]. 重庆: 西南大学, 2016.
- [14] 朱媛媛, 余斌, 曾菊新, 等. 国家限制开发区“生产—生活—生态”空间的优化: 以湖北省五峰县为例[J]. *经济地理*, 2015, 35(4): 26-32.
- [15] 马世发, 马梅, 蔡玉梅, 等. 省级尺度国土空间生态保护红线划定: 以湖南省为例[J]. *热带地理*, 2015, 35(1): 43-50.
- [16] 王枫, 董玉祥. 广州市土地利用多功能的空间差异及影响因素分析[J]. *资源科学*, 2015, 37(11): 2179-2192.
- [17] 杜国明, 孙晓兵, 王介勇. 东北地区土地利用多功能性演化的时空格局[J]. *地理科学进展*, 2016, 35(2): 232-244.
- [18] 李灿, 张凤荣, 朱泰峰, 等. 基于熵权 TOPSIS 模型的土地利用绩效评价及关联分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(5): 217-227.
- [19] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系: 以珠江三角洲城市群为例[J]. *热带地理*, 1999, 19(2): 171-177.
- [20] 汪德根, 陈田. 中国旅游经济区域差异的空间分析[J]. *地理科学*, 2011, 31(5): 528-536.
- [21] 张红. 长江经济带经济发展质量测度研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2015.

(上接第 256 页)

- [21] Wang H J, Chen Y N, Chen Z S. Spatial distribution and temporal trends of mean precipitation and extremes in the arid region, northwest of China, during 1960—2010 [J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(12): 1807-1818.
- [22] 潘晓玲, 马映军, 顾峰雪. 中国西部干旱区生态环境演变与调控研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 50-57.
- [23] 沈永平, 苏宏超, 王国亚, 等. 新疆冰川、积雪对气候变化的响应(I): 水文效应[J]. *冰川冻土*, 2013, 35(3): 513-527.
- [24] Chen Y N, Xu C C, Chen Y P, et al. Response of glacial-lake outburst floods to climate change in the Yarkant River basin on northern slope of Karakoram Mountains, China [J]. *Quaternary International*, 2010, 226(1/2): 75-81.
- [25] Forster P, Ramaswamy V, Artaxo P, et al. Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [26] Su Y Z, Zhao W Z, Su P X, et al. Ecological effects of desertification control and desertified land reclamation in an oasis-desert ecotone in an arid region: a case study in Hexi Corridor, northwest China [J]. *Ecological Engineering*, 2007, 29(2): 117-124.
- [27] Lioubimtseva E, Henebry G M. Climate and environmental change in arid Central Asia: impacts, vulnerability, and adaptations [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73(11): 963-977.
- [28] Mainguet M, Létolle R. Human-made Desertification in the Aral Sea Basin: Planning and Management Failures [J]. 1998, 41(3): 129-142.
- [29] Chen Y N, Pang Z H, Chen Y P, et al. Response of riparian vegetation to water-table changes in the lower reaches of Tarim River, Xinjiang Uygur, China [J]. *Hydrogeology Journal*, 2008, 16(7): 1371-1379.