

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2018.1189

ZHANG Anhe, DING Jianli, ZHANG Junyong, et al. Variation characteristics of actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis and its relationship with landscape pattern[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(6):1829–1839. [张桢赫, 丁建丽, 张钧泳, 等. 艾比湖绿洲实际蒸散量变化特征及与景观格局的关系[J]. 冰川冻土, 2021, 43(6):1829–1839.]

艾比湖绿洲实际蒸散量变化特征 及与景观格局的关系

张桢赫^{1,2,3}, 丁建丽^{1,2,3}, 张钧泳^{1,2,3}, 董煜⁴

(1. 新疆大学 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 新疆大学 资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3. 新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 4. 新疆师范大学 地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 基于Budyko曲线方程计算新疆艾比湖绿洲1960—2013年实际蒸散量的年际和季节变化特征, 选取研究区四期遥感影像进行土地利用/覆被分类, 使用Fragstas 4.2软件计算景观格局指数, 并分析实际蒸散量与景观格局指数之间的关系。结果表明: 艾比湖绿洲实际蒸散量多年平均值为162.97 mm, 并呈上升趋势, 变化速率为 $7.76 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$; 夏季和秋季的实际蒸散量为上升趋势, 春季则呈下降趋势; 年实际蒸散量在1987年发生突变性增加, 夏季和秋季实际蒸散量的突变年份分别为1992年和1975年, 春季不存在突变点, 这与降水量的突变状况一致, 说明降水量的变化对实际蒸散量的变化有很大影响。四期土地利用/覆被图中荒漠占主导地位, 耕地和城镇用地增长较为明显, 分别增长了409.69%和704.56%。斑块类型级别上, 不同地类的景观格局指数差异明显; 景观级别上, 各景观格局指数均为波动增加趋势。斑块类型级别上, 仅有水域斑块数量NP和斑块密度PD与实际蒸散量呈显著负相关; 景观级别上, 实际蒸散量与最大斑块指数LPI、蔓延度指数CONTAG及景观连通性指数COHESION呈负相关, 与斑块数量NP、斑块密度PD等指数呈正相关。实际蒸散量与聚集度指数AI的相关性最高, 达到0.953($P < 0.05$); 与NP和PD的相关性最低, 仅为0.148。因此, AI指数在艾比湖绿洲可以较好地表征实际蒸散量的变化。

关键词: 绿洲; 艾比湖; 实际蒸散量; 景观格局

中图分类号: S161.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)06-1829-11

0 引言

蒸散发是气候系统的一个核心过程, 对于地球大气系统的能量收支和水平衡变化至关重要, 区域长时间序列的蒸散发变化是生态水文研究的焦点问题^[1-2]。尤其在西北干旱-半干旱区, 由于远离海洋, 水汽含量较低, 大约有90%的水分通过蒸散发进入大气中参与水文过程^[3], 蒸散发对于区域水资源评价、农业灌溉、旱情监测及盐渍化等问题具有重要意义^[4]。近年来, 有学者对西北干旱-半干旱区不同尺度的潜在蒸散发和实际蒸散发进行了

研究。在较大尺度区域上, 董煜等^[5]指出新疆的潜在蒸散量呈下降趋势, 而艾比湖流域的相关研究显示, 该区域的潜在蒸散量与新疆整体变化趋势较为一致, 表现出显著的下降趋势^[6-7]。在实际蒸散量的研究中, 蹇东南等^[8]基于互补相关理论, 发现塔里木河流域实际蒸散量与潜在蒸散量呈现良好的互补关系, 实际蒸散量为上升趋势; 代鹏超等^[9]使用基于遥感的SEBAL模型发现精河流域实际蒸散量为下降趋势, 水域和耕地具有较高的实际蒸散量。以上关于干旱-半干旱区蒸散发的研

收稿日期: 2018-11-07; 修订日期: 2018-12-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961059; 41771470); 新疆教育厅自然科学重点项目(XJEDUI20181008)资助

作者简介: 张桢赫, 助理工程师, 主要从事干旱区资源环境及遥感应用研究. E-mail: 626394366@qq.com

通信作者: 丁建丽, 教授, 主要从事干旱区水盐变化遥感研究. E-mail: watarid@xju.edu.cn

究多集中于蒸散发本身的变化趋势,而缺少蒸散发与其他环境因素关系的探讨和分析,尤其是随着人类对地球陆地表面的改造不断加剧,土地利用/覆被变化所引起的水资源危机越来越受到学者的重视^[10-11]。

土地利用/覆被变化影响着生态系统的结构和功能,是影响区域蒸散发的重要因子。Liu等^[12]指出20世纪人类对耕地的开发是影响水资源的最主要的人为驱动力;Yan等^[13]发现水体和稻田的实际蒸散量较大,而城镇用地的实际蒸散量最小。利用景观格局描述土地利用/覆被变化,能够较好地反映区域生态系统的异质性和人与自然间的相互作用。景观格局方法可以高度浓缩景观格局信息,反映景观组成结构和空间支配特征。目前,已经有学者对艾比湖绿洲景观格局与水质、气溶胶等进行了探讨^[14-15]。作为区域陆面水循环中重要水文过程的蒸散发,受土地利用/覆被变化的影响显著,尤其是农地和未利用地的扩大会增加地表蒸散量^[16]。运用

景观格局分析方法能够从较大尺度定量分析区域景观格局变化,从而在一定程度上反映出实际蒸散量对景观格局变化的响应。

艾比湖绿洲是新疆重要的农业区,同时该地区生态环境脆弱,其环境变化对生态水文过程的影响具有独特性^[17]。因此,本研究选取艾比湖绿洲为研究区,探讨该区域实际蒸散量与景观格局的关系,以期从一个新的角度去分析和理解区域蒸散发的变化特征,为当地水资源管理和土地利用规划提供科学依据。

1 研究区概况

艾比湖绿洲如图1所示,其位于天山西北麓、准噶尔盆地西南部,包括阿拉山口市、博乐市、温泉县和精河县,大致范围在43°38′~45°52′ N, 79°53′~85°02′ E。研究区日平均气温6~8℃,年日照时数约为2 800 h,多年平均降水量为164.1 mm,年平均蒸发能力达到3 790 mm以上,大风天气较多。

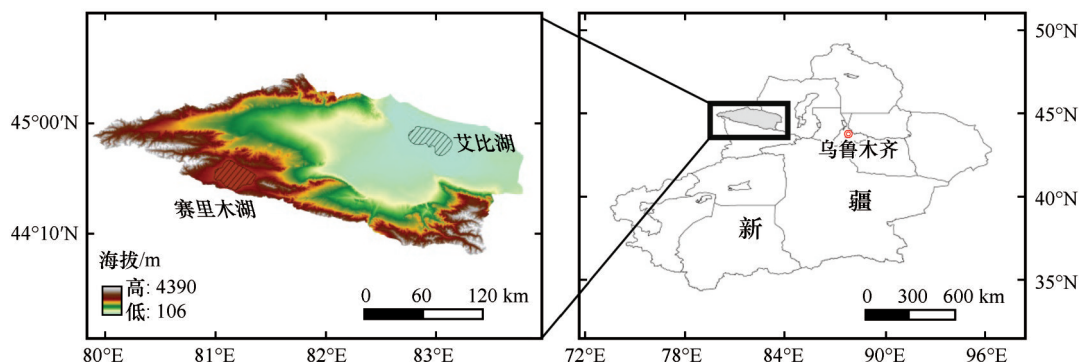


图1 研究区示意图

Fig. 1 Map of the study area

2 数据与方法

(1) 数据来源

精河站、博乐站、温泉站和阿拉山口站的气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn>),获取各站点1960—2013年逐月的平均气温、相对湿度、风速和日照时数等气象要素,将四个站点的各气象要素平均值用于实际蒸散量的计算。季节划分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12月至次年2月)。

研究区遥感影像采用Landsat系列卫星,选取无云、植被生长较好的四期影像,在ENVI中进行辐射定标、大气校正、拼接、裁剪等操作,使用监督分类

法进行影像土地利用/覆被分类。

(2) 实际蒸散量计算

Budyko^[18]假设流域中长时间序列的年蒸散发由降水及辐射能量决定,即 $E/P=f(E_0/P)=f(\omega)$,其中 P 为平均年降水量, E 为实际蒸散发, E_0 为潜在蒸散发,则蒸发指数 $\delta=E/P$ 。 E_0 用联合国粮农组织推荐的Penman-Monteith公式进行计算^[19]。Budyko^[18]根据应用实践揭示长期平均蒸散发指数表达的曲线函数,即Budyko曲线方程 $\Phi=[\delta \tan \delta^{-1} \times (1 - \cos \delta + \sin \delta)]^{\frac{1}{2}}$ 。在极端干旱条件下,降水完全被蒸发至大气,降水量认为等于实际蒸发量,因此 $E_0/P \rightarrow \infty$, $E/P \rightarrow 1$,因此利用潜在蒸散发估算实际蒸散量的公式^[19]为

$$E = P \sqrt{\frac{E_0}{P} \tan\left(\frac{P}{E_0}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{E_0}{P}\right)\right]} \quad (1)$$

(3) 实际蒸散量分析方法

使用 R/S 法^[20]计算 Hurst 指数 H , 用来表征实际蒸散量时间序列的持续性。 $H=0.5$ 时表明时间序列是随机变化的; $0.5 < H < 1$ 时, 表明时间序列具有正的持续性, H 越接近于 1, 序列的正持续性越强; $0 < H < 0.5$ 时, 表明时间序列具有负的持续性, H 越接近于 0, 序列的反持续性越强。使用 Mann-Kendall 突

变检验^[21]分析实际蒸散量的突变点, 变差系数 C_v 和偏态系数 C_s 用于分析实际蒸散量的离散程度和分布状况。以上方法通过 MATLAB 编程和 SPSS 软件实现。

(4) 景观格局指数计算

本研究结合当地的自然条件, 并参考过去的研究成果^[14, 22-23], 选择了一些较为常用且意义较为明确的景观格局指数, 具体景观格局指数如表 1 所示, 由 Fragstats 4.2 软件计算。

表 1 景观格局指数的公式及描述

Table 1 Landscape pattern indices' formulae and their descriptions

| 景观格局指数 | 公式 | 描述 |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 斑块数量 NP | $NP=n$ | NP 在斑块类型级别上等于景观中某一斑块类型的斑块总个数, 在景观级别上等于景观中所有的斑块总数 |
| 斑块密度 PD | $PD=\frac{N_{ij}}{A}$ | N_{ij} 为斑块数目, A 为斑块面积之和。PD 值越大则破碎化程度越高 |
| 最大斑块指数 LPI | $LPI=\frac{\max(a_1 \cdot a_n)}{A} \times 100\%$ | $\max(a_1 \cdot a_n)$ 为景观中最大斑块面积, A 为景观总面积 |
| 蔓延度指数 CONTAG | $CONTAG=\left(1+\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \frac{P_{ij} \ln P_{ij}}{2 \ln m}\right) \times 100\%$ | m 为斑块类型总数, P_{ij} 为随相邻的栅格数据属于类型 i 与 j 的概率 |
| 散布与并列指数 IJI | $IJI=\frac{-\sum_{k=1}^m \left[\left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right) \ln \left(\frac{e_{ik}}{\sum_{k=1}^m e_{ik}} \right) \right]}{\ln(m-1)} \times 100\%$ | e_{ik} 为与类型为 k 的斑块相邻的斑块的边长, m 为景观中存在的斑块类型数 |
| 景观连通性指数 COHESION | $COHESION=\left(1-\sum_{i=1}^n \frac{p}{\sum_{j=1}^n p \sqrt{a}}\right) \left(1-\frac{1}{\sqrt{A}}\right)$ | p 为斑块 i 在该类型中的周长, a 为斑块 i 在该类型中的面积, A 为斑块的总面积 |
| 香农多样性指数 SHDI | $SHDI=-\sum_{i=1}^n (P_i \ln P_i)$ | P_i 为第 i 类景观斑块数量占总景观斑块数量的百分比, n 为景观的斑块数量 |
| 聚集度指数 AI | $AI=\frac{G_{ii}}{\max G_{ii}} \times 100\%$ | G_{ii} 为景观类型的相似邻接斑块数量 |
| 景观形状指数 LSI | $LSI=\frac{0.25E}{\sqrt{A}}$ | E 为景观中所有斑块边界的总长度, A 为斑块总面积 |

3 结果与分析

3.1 艾比湖绿洲实际蒸散量年际及季节变化

艾比湖绿洲 1960—2013 年全年实际蒸散量的变化趋势如图 2 所示。实际蒸散量呈上升趋势, 变化速率为 $7.76 \text{ mm} \cdot (10a)^{-1}$, 多年平均值为 162.97 mm , 最小值为 69.04 mm (1969 年), 最大值为 256.09 mm (2012 年)。变差系数 C_v 为 0.24, 说明年实际蒸散量序列离散程度较小; 偏态系数 C_s 为 0.14, 说明年实际蒸散量序列为正偏分配。Hurst 指数 $H=0.76$, 说明年实际蒸散量序列具有正的持续

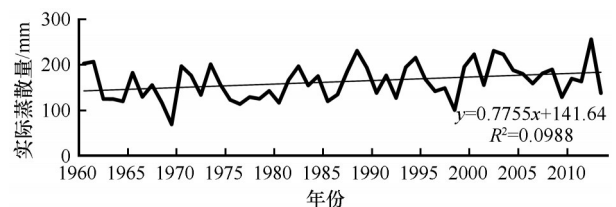


图 2 1960—2013 年艾比湖绿洲实际蒸散量变化趋势

Fig. 2 Trend of the actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis during 1960—2013

性, 即过去的一个增长趋势意味着将来的一个增长趋势, 且序列的正持续性较强。非参数 Mann-Kend-

all 单调趋势检验的统计量 $|z|=0.2048 > z(0.05)=0.1836$, 说明研究区年实际蒸散量具有显著的增加趋势。由于艾比湖绿洲处于干旱区, 由式(1)可知, 该区域的降水量几乎都被蒸发, 随着降水量的不断增加, 实际蒸散量也呈现为增加趋势。

表2为艾比湖绿洲各年代际的实际蒸散量。实际蒸散量从20世纪60年代到2000年以后整体为增

加趋势, 但20世纪90年代的实际蒸散量与80年代相比出现了下降。20世纪60—70年代和90年代的实际蒸散量均为负距平, 这些时期的实际蒸散量要小于多年平均值, 而20世纪80年代和2000年以后均为正距平, 这两个时期的实际蒸散量比多年平均更大, 其中从2000年以后开始转为最大的正距平, 说明这一时期的实际蒸散量的增加较为显著。

表2 艾比湖绿洲实际蒸散量年际与季节变化(单位: mm)
Table 2 Interannual and seasonal variation of the actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis (unit: mm)

| 年代/年份 | 全年 | | 春季 | | 夏季 | | 秋季 | |
|------------|--------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 平均 | 距平 | 平均 | 距平 | 平均 | 距平 | 平均 | 距平 |
| 20世纪60年代 | 143.19 | -19.78 | 16.89 | 0.48 | 20.95 | -1.81 | 7.01 | -3.42 |
| 20世纪70年代 | 149.93 | -13.04 | 15.67 | -0.73 | 20.95 | -1.80 | 9.92 | -0.52 |
| 20世纪80年代 | 167.55 | 4.58 | 16.21 | -0.18 | 21.59 | -1.16 | 12.88 | 2.45 |
| 20世纪90年代 | 160.76 | -2.21 | 16.56 | 0.16 | 21.87 | -0.88 | 9.10 | -1.34 |
| 2000年以后 | 184.72 | 21.75 | 16.59 | 0.19 | 26.79 | 4.04 | 12.46 | 2.02 |
| 1960—2013年 | 162.97 | — | 16.40 | — | 22.75 | — | 10.44 | — |

由于艾比湖绿洲冬季气温均在0℃以下, 气候寒冷干燥, 实际蒸散量极低, 因此本研究只分析春季、夏季和秋季的实际蒸散量变化特征。三个季节中, 1960—2013年夏季的平均实际蒸散量最高, 为22.75 mm, 秋季最低为10.44 mm。夏季和秋季实际蒸散量的变化趋势与全年的变化趋势一致, 均为上升趋势, 而春季实际蒸散量为下降趋势, 且变化幅度较小。秋季2000年以后实际蒸散量与20世纪60年代相比增长最大, 增幅达到77.7%, 夏季实际蒸散量在20世纪60—90年代均为不断减小的负距平, 2000年以后转为正距平, 而秋季在20世纪80年代和2000年以后均出现了正距平, 说明夏季实际蒸散量为持续的增加趋势, 并且在2000年以后增加的更为明显, 而秋季实际蒸散量在整个年代际中波动较为明显。

对艾比湖绿洲全年以及春季、夏季和秋季的实际蒸散量进行Mann-Kendall突变检验(图3), 研究区实际蒸散量在20世纪60—80年代变化不明显, 而从80年代以来, 实际蒸散量有一个明显的上升趋势, 尤其是在2003年之后, 这种增加的趋势均超过了显著性水平0.05临界线, 说明实际蒸散量的增加趋势是显著的。而通过观察UF和UB交点的位置可以确定实际蒸散量是从1987年开始突变性增加的。对1960—1986年和1987—2013年这两个时期的实际蒸散量进行t检验, 结果为 $|t_0|=2.902 > t_{0.01}=2.674$, 说明这两个时期的实际蒸散量具有显

著差异, 1987年为突变点。春季实际蒸散量不存在突变点, 夏季和秋季的突变性增加年份分别为1992年和1975年。对全年以及春季、夏季和秋季的降水量进行Mann-Kendall突变检验(图4), 发现年际、夏季和秋季的降水量的突变年份与实际蒸散量的突变年份一致, 均为1987年、1992年和1975年, 春季同样不存在突变点, 说明艾比湖绿洲降水量的变化趋势对于实际蒸散量的变化影响很大。全年实际蒸散量在突变后的均值比突变前的均值增加了29.97 mm, 增长幅度为20.25%, 夏季和秋季实际蒸散量在突变后比突变前分别增长了21.88%和39.91%。

3.2 艾比湖绿洲土地利用变化

本研究利用ENVI软件, 依据全国土地资源分类系统和研究区土地利用现状, 将研究区土地利用/覆被划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地、荒漠和盐渍地这7个土地利用/覆被类型, 通过支持向量机分类与人工目视解译相结合的方法进行分类, 基于混淆矩阵法和野外采样点进行精度评价, 分类总精度均大于85%, 可以进行进一步的研究。

图5为四个时期研究区各地类的面积, 可以看出四个时期中荒漠占主导地位, 其面积远远大于其他地类的面积, 四期所占比重均超过50%, 耕地与城镇建设用地持续增长, 且增长幅度较大, 2013年其面积比1990年分别增长了409.69%和704.56%, 林地、草地和水域的面积均为波动下降的趋势, 盐

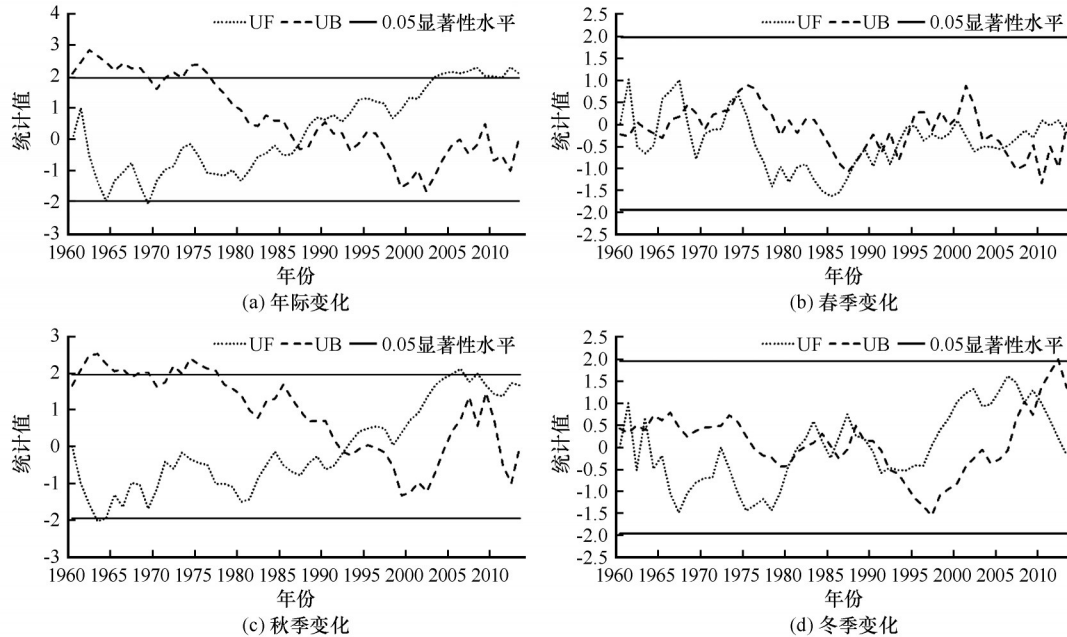


图3 艾比湖绿洲实际蒸散量Mann-Kendall突变检验

Fig. 3 Interannual and seasonal Mann-Kendall mutation test for the actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis

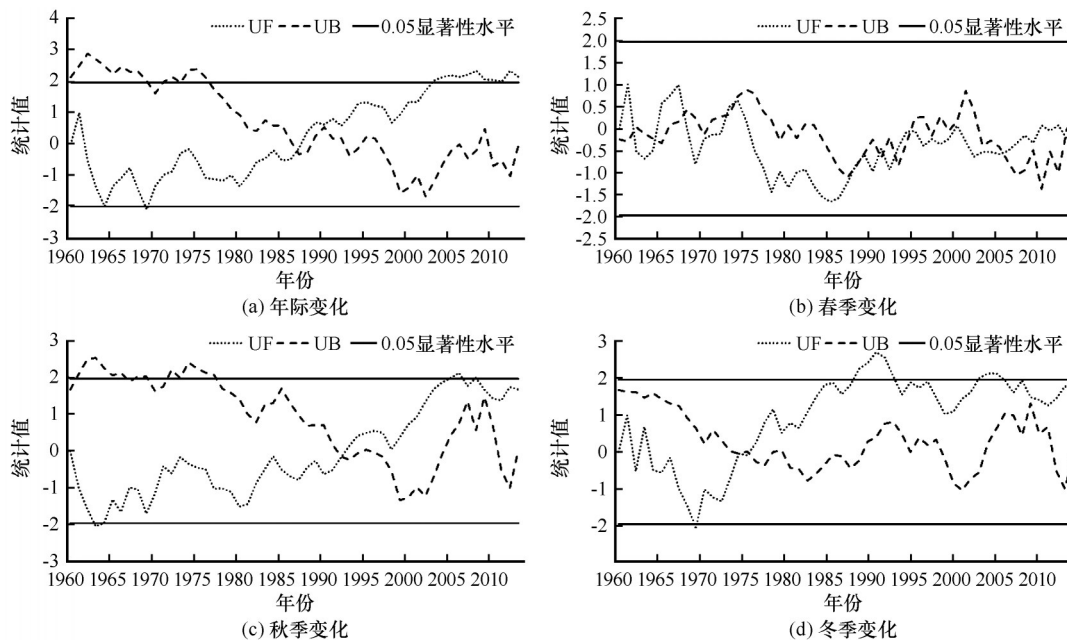


图4 艾比湖绿洲降水量Mann-Kendall突变检验

Fig. 4 Interannual and seasonal Mann-Kendall mutation test for the precipitation in the Ebinur Lake oasis

渍地面积则为波动增加的趋势。表3为1960—2013年艾比湖绿洲土地利用/覆被转移矩阵,可以看出1990—1997年间,新增耕地面积中来源于草地的面积占到33.06%,来源于荒漠的面积则占到39.25%,林地和草地面积的减少主要转化为荒漠和耕地,城镇面积的增长主要来源于荒漠,而增加的盐渍地面积中有85.17%都来源于荒漠;1997—2006年新增耕地面积中有37.48%来源于荒漠,有28.57%来源

于草地,而有64.65%的新增草地面积来源于荒漠,新增城镇面积的主要来源还是荒漠,水域面积的增长主要来源于盐渍地;2006—2013年间,大量减少的草地面积主要转化为耕地和部分林地,荒漠持续转化为城镇用地,而盐渍地的增长主要来源于水域的减少,并且部分草地也转化为了盐渍地;从1990—2013年来看,荒漠始终是新增耕地和新增城镇用地面积的最主要来源,其比例均超过了50%,盐渍

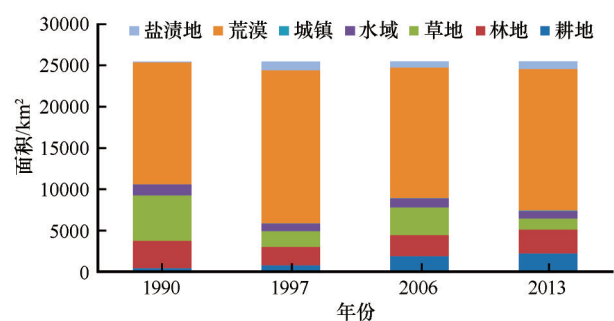


图5 艾比湖绿洲地类的面积变化
Fig. 5 Change of land use/cover area in the Ebinur Lake oasis

地的增加除了部分来源于荒漠外,水域面积的减少

也是重要因素,草地退化较为严重,有 60.42% 的草地都变为荒漠,整体上艾比湖绿洲的天然植被呈现不断减少的趋势,而耕地、城镇用地这些人工绿洲呈逐渐增加的趋势。1990—2013 年间的土地利用/覆被变化与气候变化和人类活动关系密切。强烈的蒸发和较少的降雨造成艾比湖绿洲的荒漠景观占主导地位,林地和草地的波动下降可能与该区域太阳辐射量下降^[24]以及人工绿洲的扩张有关,而水域和盐渍地的面积变化与遥感影像当年的气候状况有关,具有一定的不确定性;随着当地经济社会的快速发展,耕地和城镇建设用地的大幅度增加则

为人类活动导致。

表3 1990—2013年艾比湖绿洲土地利用/覆被转移矩阵(单位: km²)
Table 3 Transition matrix of land use/cover in the Ebinur Lake oasis during 1990—2013 (unit: km²)

| 年份 | 土地利用/覆被类型 | 耕地 | 林地 | 草地 | 水域 | 城镇 | 荒漠 | 盐渍地 |
|------------|-----------|----------|----------|----------|--------|------|-----------|--------|
| 1990—1997年 | 耕地 | 211.27 | 0.40 | 255.44 | 0.30 | 0.03 | 303.25 | 1.94 |
| | 林地 | 0.66 | 1 599.36 | 213.19 | 0.17 | 0.01 | 421.93 | 0.12 |
| | 草地 | 95.75 | 300.05 | 999.62 | 0.38 | 0.12 | 501.69 | 4.30 |
| | 水域 | 0.20 | 0.18 | 1.76 | 934.32 | 0.07 | 3.81 | 0.46 |
| | 城镇 | 0.26 | 0.01 | 1.19 | 0.15 | 3.38 | 2.75 | 0.03 |
| | 荒漠 | 127.55 | 1 408.25 | 4 007.57 | 13.02 | 0.88 | 12 938.73 | 52.11 |
| | 盐渍地 | 0.29 | 0.72 | 19.92 | 84.46 | 0.12 | 913.80 | 53.67 |
| 1997—2006年 | 耕地 | 639.31 | 0.30 | 540.58 | 0.12 | 0.04 | 708.48 | 1.46 |
| | 林地 | 5.99 | 703.75 | 439.56 | 0.01 | 0.01 | 1 394.95 | 1.28 |
| | 草地 | 91.62 | 481.73 | 544.78 | 5.79 | 0.84 | 2 170.15 | 62.77 |
| | 水域 | 0.38 | 0.78 | 1.45 | 924.74 | 0 | 18.00 | 149.43 |
| | 城镇 | 0.70 | 0.02 | 0.79 | 0.65 | 6.51 | 7.09 | 0.15 |
| | 荒漠 | 32.88 | 1 048.67 | 355.44 | 3.15 | 0.98 | 14 107.12 | 277.09 |
| | 盐渍地 | 1.77 | 0.15 | 19.29 | 6.34 | 0.19 | 142.32 | 580.79 |
| 2006—2013年 | 耕地 | 1 553.05 | 8.04 | 258.87 | 0.05 | 0.17 | 389.19 | 12.75 |
| | 林地 | 7.54 | 1 302.73 | 927.39 | 0.33 | 0.02 | 645.11 | 0.21 |
| | 草地 | 171.44 | 65.56 | 524.09 | 4.59 | 0.28 | 557.66 | 15.47 |
| | 水域 | 0.62 | 0.61 | 4.59 | 891.20 | 0.02 | 4.34 | 2.72 |
| | 城镇 | 3.66 | 0.19 | 2.69 | 0.01 | 9.42 | 20.55 | 0.57 |
| | 荒漠 | 153.38 | 1 165.00 | 1 583.87 | 3.06 | 5.78 | 14 073.17 | 160.15 |
| | 盐渍地 | 0.60 | 3.42 | 55.43 | 195.55 | 0.25 | 135.33 | 558.98 |
| 1990—2013年 | 耕地 | 299.28 | 0.59 | 669.40 | 0.16 | 0.03 | 1 230.01 | 22.64 |
| | 林地 | 7.73 | 1 633.25 | 1 070.18 | 0.09 | 0.01 | 172.00 | 0.08 |
| | 草地 | 73.35 | 345.83 | 399.50 | 6.76 | 0.06 | 508.24 | 5.33 |
| | 水域 | 0.26 | 1.67 | 4.72 | 891.18 | 0 | 6.21 | 0.04 |
| | 城镇 | 4.17 | 0.14 | 9.37 | 0.01 | 3.58 | 19.71 | 0.10 |
| | 荒漠 | 51.05 | 1 323.69 | 3 321.92 | 9.20 | 0.69 | 12 405.67 | 32.19 |
| | 盐渍地 | 0.15 | 3.78 | 23.59 | 125.43 | 0.24 | 744.11 | 52.26 |

3.3 艾比湖绿洲景观格局变化

由表4各时期景观格局指数可以看出,斑块类型级别上,草地拥有最多的斑块数量NP和最大的

斑块密度PD,水域的斑块数量最少,说明草地的破碎度最高,水域由于位置相对固定,破碎度最低;斑块密度PD与林地、草地和荒漠的面积的变化趋势

| 表4 1990—2013年艾比湖绿洲斑块类型级别的景观格局指数 | | | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------|------------------------|-------|--------|-------|-------|
| Table 4 Landscape pattern indices at patch types level in the Ebinur Lake oasis during 1990—2013 | | | | | | | |
| 地类 | 年份 | NP/个 | PD/ km ² | LPI/% | LSI | IJI/% | AI/% |
| 耕地 | 1990年 | 8 929 | 0.19 | 0.02 | 122.17 | 18.19 | 82.56 |
| | 1997年 | 9 703 | 0.21 | 0.28 | 125.95 | 31.87 | 86.49 |
| | 2006年 | 9 830 | 0.21 | 1.12 | 111.06 | 31.72 | 92.40 |
| | 2013年 | 9 260 | 0.20 | 1.38 | 105.75 | 34.83 | 93.33 |
| 林地 | 1990年 | 37 103 | 0.79 | 1.06 | 199.66 | 38.49 | 89.63 |
| | 1997年 | 40 460 | 0.86 | 0.48 | 228.65 | 21.34 | 85.54 |
| | 2006年 | 36 711 | 0.78 | 1.65 | 180.49 | 32.52 | 89.32 |
| | 2013年 | 42 864 | 0.91 | 0.95 | 235.48 | 34.77 | 86.89 |
| 草地 | 1990年 | 71 860 | 1.52 | 1.70 | 326.63 | 45.08 | 86.82 |
| | 1997年 | 83 722 | 1.77 | 0.36 | 351.29 | 41.70 | 75.88 |
| | 2006年 | 89 150 | 1.89 | 0.45 | 445.46 | 54.25 | 76.97 |
| | 2013年 | 114 657 | 2.43 | 0.15 | 433.34 | 55.82 | 64.52 |
| 水域 | 1990年 | 868 | 0.02 | 1.19 | 6.43 | 42.33 | 99.49 |
| | 1997年 | 959 | 0.02 | 1.00 | 6.44 | 40.03 | 99.47 |
| | 2006年 | 792 | 0.01 | 1.32 | 7.25 | 57.38 | 99.43 |
| | 2013年 | 683 | 0.01 | 0.97 | 5.15 | 56.64 | 99.59 |
| 城镇 | 1990年 | 184 | 0.01 | 0.01 | 7.03 | 50.32 | 91.40 |
| | 1997年 | 900 | 0 | 0.01 | 2.82 | 35.27 | 98.02 |
| | 2006年 | 1 527 | 0.03 | 0.02 | 21.21 | 51.16 | 84.68 |
| | 2013年 | 1 229 | 0.03 | 0.03 | 17.39 | 36.30 | 91.88 |
| 荒漠 | 1990年 | 61 115 | 1.29 | 28.19 | 186.50 | 40.63 | 95.47 |
| | 1997年 | 48 314 | 1.02 | 37.68 | 186.98 | 60.85 | 95.90 |
| | 2006年 | 47 549 | 1.01 | 30.27 | 151.99 | 43.96 | 96.40 |
| | 2013年 | 36 886 | 0.78 | 34.57 | 156.32 | 60.26 | 96.44 |
| 盐渍地 | 1990年 | 2 608 | 0.06 | 0.03 | 57.84 | 27.40 | 83.88 |
| | 1997年 | 30 387 | 0.64 | 1.84 | 120.20 | 16.07 | 89.07 |
| | 2006年 | 11 056 | 0.23 | 0.43 | 78.49 | 36.67 | 91.51 |
| | 2013年 | 8 489 | 0.18 | 1.64 | 57.08 | 26.57 | 94.53 |

相反,而与其他地类的面积变化较为一致;荒漠的最大斑块指数LPI最高,说明艾比湖绿洲尽管人工绿洲不断扩大,但整体上荒漠还是占据整个景观类型的主导地位,LPI与各土地利用/覆被类型的面积的变化趋势均较一致;草地具有最高的景观形状指数LSI,说明草地的形状构成最为复杂,而形状相对

固定的水域的LSI最低;由于艾比湖绿洲处于干旱区,许多植被受制于水的分布而彼此邻近,因此各土地利用/覆被类型的散布与并列指数IJI普遍较高,而盐渍地多围绕湖泊与耕地分布,因此其IJI值相对较低;城镇的面积相对集中,因此具有最高的聚集度指数AI,而较为分散的草地AI值最低。

由表5可知,景观级别上,各景观格局指数均为波动增加趋势。其中斑块数量NP从1990年的182 671个增加到2013的214 072个,景观破碎度增大;斑块密度PD在1990年最低,仅为3.87个·km⁻²,而在之后的三个时期均大于4个·km⁻²;香农多样性指数SHDI在1997年最低,说明这一时期土地利用较为单一,破碎化程度较低,其不确定性的信息含量较小,而SHDI在2006年出现最大值,说明这一时期土地利用复杂,不确定性高;蔓延度指数CONTAG的最大值出现在1997年,说明这一时期斑块类型形成了较好的连接性,破碎度较低;各时期中景观连通性指数COHESION均较高,艾比湖绿洲整体上的景观连通较好。

3.4 实际蒸散量与景观格局指数的相关性

为分析艾比湖绿洲1990—2013年不同地类景观格局指数与实际蒸散量的关系,将不同地类的景观格局指数与当年实际蒸散量进行相关性分析,结果如表6所示。在各地类中,水域的各景观格局指数与实际蒸散量的相关性普遍较高,而林地的各景观格局指数与实际蒸散量的相关性普遍较低,其他地类的各景观格局指数与实际蒸散量的相关性差别不大。在各地类的景观格局指数与实际蒸散量的相关系数中,仅有水域的NP和PD与实际蒸散量呈现显著负相关,相关系数达到-0.981($P<0.05$),说明大面积的水域对于当地涵养水分、抑制蒸散具有十分重要的作用。景观级别上,各景观格局指数与实际蒸散量的相关系数如表7所示。选取的8个景观格局指数中,实际蒸散量与LPI、CONTAG和COHESION呈负相关,与其他指数呈正相关;AI与实际蒸散量的相关性最高,达到0.953($P<0.05$),表

| 表5 1990—2013年艾比湖绿洲景观级别的景观格局指数 | | | | | | | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------------------|--------|----------|--------|----------|-------|--------|
| Table 5 Landscape pattern indices at landscape level in the Ebinur Lake oasis during 1990—2013 | | | | | | | | |
| 年份 | NP/个 | PD/km ² | LPI/% | CONTAG/% | IJI/% | COHESION | SHDI | AI/% |
| 1990年 | 182 671 | 3.867 | 28.189 | 64.715 | 41.156 | 99.899 | 1.300 | 95.449 |
| 1997年 | 213 558 | 4.521 | 37.677 | 66.609 | 47.252 | 99.947 | 1.230 | 95.314 |
| 2006年 | 196 623 | 4.162 | 30.268 | 63.575 | 47.184 | 99.886 | 1.353 | 95.862 |
| 2013年 | 214 072 | 4.532 | 34.574 | 65.103 | 51.404 | 99.929 | 1.300 | 96.793 |

表6 艾比湖绿洲各地类不同景观格局指数
与实际蒸散量的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between different landscape
pattern indices of different land use/cover and the actual
evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis

| 地类 | 景观格局指数 | 相关系数 | 地类 | 景观格局指数 | 相关系数 |
|----|--------|---------|-----|--------|--------|
| 耕地 | NP | -0.343 | 城镇 | NP | 0.681 |
| | PD | -0.344 | | PD | 0.695 |
| | LPI | 0.763 | | LPI | 0.795 |
| | LSI | -0.912 | | LSI | 0.709 |
| | IJI | 0.294 | | IJI | -0.060 |
| | AI | 0.639 | | AI | -0.415 |
| 林地 | NP | 0.433 | 荒漠 | NP | -0.588 |
| | PD | 0.433 | | PD | -0.586 |
| | LPI | 0.353 | | LPI | -0.174 |
| | LSI | 0.188 | | LSI | -0.710 |
| | IJI | 0.643 | | IJI | 0.098 |
| | AI | 0.166 | | AI | 0.575 |
| 草地 | NP | 0.792 | 盐渍地 | NP | -0.645 |
| | PD | 0.792 | | PD | -0.645 |
| | LPI | -0.256 | | LPI | 0.032 |
| | LSI | 0.636 | | LSI | -0.795 |
| | IJI | 0.865 | | IJI | 0.460 |
| | AI | -0.622 | | AI | 0.606 |
| 水域 | NP | -0.981* | | | |
| | PD | -0.981* | | | |
| | LPI | -0.149 | | | |
| | LSI | -0.646 | | | |
| | IJI | 0.775 | | | |
| | AI | 0.762 | | | |

注：*表示通过了0.05显著性水平检验。

明区域景观格局越集中,实际蒸散量会越高;NP和PD的相关性最低,仅为0.148。斑块数量NP、香农多样性指数SHDI、景观连通性指数CONTAG、散布与并列指数IJI和聚集度指数AI均表征了景观的破碎程度,但这些景观格局指数与实际蒸散量既有正相关也有负相关,说明景观格局的破碎程度虽与实际蒸散量普遍具有较好的相关性,但其对实际蒸散量的影响还具有较大的不确定性。所选的8个景观

格局指数中,仅有AI与实际蒸散量的相关系数具有显著性,艾比湖绿洲土地利用/覆被集中程度的提高也在一定程度上增加了该区域的实际蒸散量。

4 讨论

因为较难通过仪器测定足够数量的、可靠的实际蒸散量数据,目前多采用模型计算方式获取实际蒸散量值^[25]。较为常用的实际蒸散量计算方法包括AA模型、GG模型、CRAE模型^[26]和傅抱璞公式^[27]等,本研究使用Budyko曲线进行实际蒸散量计算,其在较大的时空尺度下估测长时间序列的蒸发指数,精度较高,误差较少^[19]。但相较于SEBAL等基于遥感的蒸散发模型,该方法只能反映出一个区域整体的实际蒸散量,缺乏关于空间上的表达,无法对于不同土地利用/覆被下的蒸散量做出分析,在过去的研究中,已有学者发现不同土地利用/覆被状况下的蒸散发有较大差异^[9,16],因此在今后的研究中可使用基于遥感的蒸散发模型对于艾比湖绿洲不同土地利用/覆被下的实际蒸散量变化做更为深入的分析。

在全球变暖的背景下,全球实际蒸散量理论上应该表现为增加趋势,然而全球许多地点观测到的实际蒸散量却为稳定的下降趋势^[28],关于出现的“蒸发悖论”,有学者指出这可能是由于全球太阳辐射与风速的下降和潜在蒸散量与实际蒸散量的互补关系导致的^[29]。本文中实际蒸散量为增加趋势,没有出现“蒸发悖论”,一方面可能是由于艾比湖绿洲地处西北干旱区,荒漠占主导地位,虽然西北地区的风速有较为明显的下降^[30],但蒸发强烈,气候干燥,实际蒸散发与潜在蒸散发难以形成有效互补,随着全球气候的变暖,干旱区的蒸发会更强烈^[31]。董煜^[19]对1960—2013年各气候因子对实际蒸散量的相对贡献率进行分析,发现降水量的相对贡献率到达50%以上,其次是风速。艾比湖绿洲显著增加的降雨量是该区域实际蒸散量呈增加趋势的一个重要原因。另一方面,人类活动也在一定程度上影响了下垫面的蒸散量变化。有大量研究表

表7 艾比湖绿洲景观格局指数与实际蒸散量的相关系数

Table 7 Correlation coefficients between different landscape pattern indices and
the actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis

| 景观格局指数 | NP/个 | PD/km ² | LPI/% | CONTAG/% | IJI/% | COHESION | SHDI | AI/% |
|--------|-------|--------------------|--------|----------|-------|----------|-------|--------|
| 相关系数 | 0.148 | 0.148 | -0.174 | -0.429 | 0.524 | -0.177 | 0.517 | 0.953* |

注：*表示通过了0.05显著性水平检验。

明在过去几十年间艾比湖绿洲的土地利用/覆被发生了显著的变化^[32-33], 气候变化和人类活动都是土地利用/覆被变化的驱动因素, 其中人类活动是土地利用/覆被变化最主要的驱动力^[33], 耕地扩张、城镇建设等活动显著地改变了艾比湖绿洲的下垫面, 不同的下垫面类型也改变着区域的生态水文过程^[16]。阿布都沙拉木等^[34]发现在干旱-半干旱区, 植被覆盖度较高的区域实际蒸散量也较高, 不断增大的植被面积会增加艾比湖绿洲的实际蒸散量, 这也可能是其表现为上升趋势的原因。

对于多数景观格局指数与实际蒸散量的相关系数没有表现出足够高的可信度, 这可能存在两方面的原因: 第一, 景观格局指数虽然是描述区域景观格局变化的有效方式, 但其可能从机理上较难解释一些自然过程和人为活动过程的变化。王泉泉等^[35]、杨帆等^[36]、金佳莉等^[37]分别使用景观格局指数对人类经济活动、土壤理化因子和地表温度进行相关性分析, 结果表明其二者的相关性普遍较低, 有很多相关系数仅为 0.01~0.03 之间, 而部分 P 值超过了 0.7, 因此景观格局指数对于一些现象并不能很好地解释。第二, 本研究进行相关分析的样本数太少。由于考虑到遥感影像的质量和可获得性, 只选取了四期遥感影像, 导致用于相关性分析的景观格局指数过少, 使很多相关系数无法表现出显著性。下一步的研究将考虑使用 MODIS 等高时间分辨率土地利用/覆被产品与实际蒸散量进行分析, 深入探讨二者的关系。

5 结论

本研究对艾比湖绿洲 1960—2013 年的实际蒸散量变化特征进行分析, 并结合四期土地利用/覆被数据从景观格局的角度分析了实际蒸散量对景观格局的响应, 得出以下结论:

(1) 艾比湖绿洲年际实际蒸散量平均值为 162.97 mm, 呈上升趋势; 夏季的平均实际蒸散量最高, 为 22.75 mm, 秋季最低为 10.44 mm; 年际实际蒸散量在 1987 年发生突变性增加, 夏季和秋季的突变点分别为 1992 年和 1975 年。

(2) 四期土地利用/覆被图中荒漠占主导地位, 耕地和城镇用地增长较为明显, 分别增长了 409.69% 和 704.56%, 林地、草地和水域的面积均为波动下降的趋势, 盐渍地面积则为波动增加的趋势。

(3) 斑块类型级别上, 不同地类的景观格局指数差异明显, 水域的斑块数量最少, 荒漠的 LPI 值最高, 草地和城镇具有最高的 LSI 和 AI; 景观级别上, 各景观格局指数均为波动增加趋势。

(4) 斑块类型级别上, 仅有水域的 NP 和 PD 与实际蒸散量呈显著负相关; 景观级别上, 实际蒸散量与 LPI、CONTAG 和 COHESION 呈负相关, 与 NP、PD 等指数呈正相关, 实际蒸散量与 AI 的相关性最高, 达到 0.953 ($P < 0.05$), 而与 NP 和 PD 的相关性最低, 仅为 0.148。仅有 AI 与实际蒸散量的相关系数具有显著性。

参考文献 (References):

- [1] Wang Weiguang, Peng Shizhang, Yang Tao, et al. Spatial and temporal characteristics of reference evapotranspiration trends in the Haihe River basin, China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2011, 16(3): 239-252.
- [2] Jhajharia D, Dinpashoh Y, Kahya E, et al. Trends in reference evapotranspiration in the humid region of northeast India[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(3): 421-435.
- [3] Xu Zhen, Yang Haibo, Liu Fude, et al. Partitioning evapotranspiration flux components in a subalpine shrubland based on stable isotopic measurements[J]. *Botanical Studies*, 2008, 49(4): 351-361.
- [4] Courault D, Seguin B, Olioso A. Review on estimation of evapotranspiration from remote sensing data: from empirical to numerical modeling approaches[J]. *Irrigation and Drainage Systems*, 2005, 19(3/4): 223-249.
- [5] Dong Yu, Haimiti Yimiti. Spatio-temporal variability and trend of potential evapotranspiration in Xinjiang from 1961 to 2013[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 153-161. [董煜, 海米提·依米提. 1961-2013 年新疆潜在蒸散量变化特征及趋势[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 153-161.]
- [6] Tan Jiao, Ding Jianli, Dong Yu, et al. Decadal variation of potential evapotranspiration in Ebinur Lake oasis of Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(5): 143-148. [谭娇, 丁建丽, 董煜, 等. 新疆艾比湖绿洲潜在蒸散量年代际变化特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(5): 143-148.]
- [7] Reziwanguli Maimaitiyiming, Yang Jianjun, Liu Wei. Changing characteristics of potential evapotranspiration, air temperature and precipitation in Ebinur Lake basin from 1957 to 2013[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(1): 69-76. [热孜宛古丽·麦麦提依明, 杨建军, 刘巍. 艾比湖流域 1957-2013 年潜在蒸散、气温、降水变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(1): 69-76.]
- [8] Jian Dongnan, Li Xiucang, Tao Hui, et al. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration and its influence factors in the Tarim River basin based on the complementary relationship approach[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2016, 38(3): 750-760. [蹇东南, 李修仓, 陶辉, 等. 基于互补相关理论的塔里木河流域实际蒸散发时空变化及影响因素分析[J]. *冰川冻土*, 2016, 38(3): 750-760.]
- [9] Dai Pengchao, Niu Sujuan, Wu Zhaopeng, et al. Temporal and spatial characteristics of actual evapotranspiration in Jinghe

- watershed, Xinjiang[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(7): 600-606. [代鹏超, 牛苏娟, 毋兆鹏, 等. 新疆精河流域实际蒸散发时空变化特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(7): 600-606.]
- [10] Kuang Wenhui, Liu Jiuyan, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal dynamics of impervious surface areas across China during the early 21st century [J]. *Science Bulletin*, 2013, 58(14): 1691-1701.
- [11] Guo Ying, Shen Yanjun. Quantifying water and energy budgets and the impacts and human factors in the Haihe basin, China: 2. trends and implications to water resources [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527(1): 251-261.
- [12] Liu Mingling, Tian Hanqin, Chen Guangsheng, et al. Effects of land-use and land-cover change on evapotranspiration and water yield in China during 1900-2000[J]. *Journal of the American Water Resources*, 2008, 44(5): 1193-1207.
- [13] Yan Nana, Tian Fuyou, Wu Bingfang, et al. Spatiotemporal analysis of actual evapotranspiration and its causes in the Hai basin[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(2): 332-348.
- [14] Wang Xiaoping, Zhang Fei, Jing Yunqing, et al. Relationship between land cover-landscape spatial characteristics and aerosol optical depth in Ebinur Lake watershed[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(22): 273-283. [王小平, 张飞, 井云清, 等. 艾比湖流域气溶胶光学厚度与土地覆被景观格局关联分析[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(22): 273-283.]
- [15] Cao Can, Zhang Fei, Ayinigeer Yalikun, et al. Relationship between landscape pattern and water quality in the Ebinur Lake region[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(4): 1568-1577. [曹灿, 张飞, 阿依尼格尔·亚力坤, 等. 艾比湖区域景观格局与河流水质关系探讨[J]. *环境科学*, 2018, 39(4): 1568-1577.]
- [16] Qiu Guoyu, Li Ruili. Climate change and regional water budget: measurement, remote sensing, and simulation [M]. Beijing: Science Press, 2011. [邱国玉, 李瑞利. 气候变化与区域水分收支: 实测、遥感与模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2011.]
- [17] Qin Peng, Liu Qiang. Spatiotemporal variation of evapotranspiration in Ebinur Lake basin from 1961 to 2012[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2017(6): 111-117. [秦鹏, 刘强. 艾比湖流域潜在蒸散量时空变化特征[J]. *中国农村水利水电*, 2017(6): 111-117.]
- [18] Budyko M I. The effect of solar radiation variations on the climate of the Earth[J]. *Tellus*, 1969, 21(5): 611-619.
- [19] Dong Yu. Response of streamflow to climate and land use/cover change in Ebinur basin [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2016. [董煜. 艾比湖流域气候与土地利用覆被变化的径流响应研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2016.]
- [20] Lei Jiangqun, Liu Dengfeng, Huang Qiang. Climate change and spatiotemporal distribution of dry-wet status in Wei River basin[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2015, 45(3): 175-181. [雷江群, 刘登峰, 黄强. 渭河流域气候变化及干湿状况时空分布分析[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(3): 175-181.]
- [21] Wei Fengying. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.]
- [22] Li Zhe, Zhang Fei, Zhang Haiwei, et al. Analysis of the environmental cumulative effects and landscape pattern in the typical region of Ebinur Lake[J]. *Environmental Science and Technology*, 2018, 41(4): 172-181. [李哲, 张飞, 张海威, 等. 艾比湖典型区域景观格局及累积环境效应研究[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(4): 172-181.]
- [23] Jing Yunqing, Zhang Fei, Chen Lihua, et al. Investigation on eco-environmental effects of land use/cover-landscape pattern and climate change in Ebinur Lake Wetland Nature Reserve [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(9): 3590-3601. [井云清, 张飞, 陈丽华, 等. 艾比湖湿地土地利用/覆被-景观格局和气候变化的生态环境效应研究[J]. *环境科学学报*, 2017, 37(9): 3590-3601.]
- [24] Tan Jiao, Ding Jianli, Chen Wenqian, et al. Characteristics of solar radiation in Aibi Lake in recent 54 years[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2018, 46(3): 532-538. [谭娇, 丁建丽, 陈文倩, 等. 近54年艾比湖绿洲太阳辐射变化特征[J]. *气象科技*, 2018, 46(3): 532-538.]
- [25] Li Xiucang, Jiang Tong, Wen Shanshan, et al. Spatio-temporal variation of evapotranspiration and its impact factors in the Pearl River basin, China[J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014, 30(3): 483-494. [李修仓, 姜彤, 温姗姗, 等. 珠江流域实际蒸散发的时空变化及影响要素分析[J]. *热带气象学报*, 2014, 30(3): 483-494.]
- [26] Zhao Lingling, Chen Xi, Xia Jun, et al. Variation of complementary relationship of evapotranspiration with climate changes and its cause analysis in Wujiang basin [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2011, 39(6): 629-634. [赵玲玲, 陈喜, 夏军, 等. 气候变化下乌江流域蒸散发互补关系变化及成因辨识[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(6): 629-634.]
- [27] Prangma G J, Roozkrans J N. Using AVHRR HRPT imagery in assessing water quality parameters [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10(4/5): 811-818.
- [28] Mei Xing, Shen Bing, Mo Shuhong. Characteristics of evapotranspiration change with time and space in Guanzhong region of Shaanxi Province [J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2012, 3(1): 11-16. [梅星, 沈冰, 莫淑红. 陕西关中地区实际蒸发量的时空变化特性分析[J]. *黑龙江大学学报*, 2012, 3(1): 11-16.]
- [29] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111(2): 83-91.
- [30] Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai, et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近50年来中国气候变化特征的再分析[J]. *气象学报*, 2004, 62(2): 228-236.]
- [31] Sun Ge, Alstad K, Chen Jiquan, et al. A general projective model for estimating monthly ecosystem evapotranspiration [J]. *Ecohydrology*, 2011, 4(2): 245-255.
- [32] Bai Zelong, Bao Anming, Zhao Jin, et al. Land use/cover changes of Ebinur Lake watershed in recent forty years [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(2): 172-177. [白泽龙, 包安明, 赵金, 等. 艾比湖流域近40年来土地利用与覆被动态变化研究[J]. *水土保持通报*, 2012, 32(2): 172-177.]
- [33] Wang Lu, Ding Jianli. Land use/forest vegetation change and its driving forces of Ebinur Lake at the landscape scale [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(1): 217-223. [王璐, 丁建丽. 基于景观尺度的艾比湖保护区LUCC变化及其驱动力分析[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 217-223.]
- [34] Abdusalam Turup, Mamat Sawut, Ilyas Nurmamat, et al.

- Temporal and spatial characteristics of land use/cover change and evapotranspiration in Weigan-Kuqa River Delta oasis based on Landsat data[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2018, 54(3): 340-347. [阿布都沙拉木·吐鲁甫, 买买提·沙吾提, 依力亚斯江·努尔麦麦提, 等. 渭-库绿洲土地利用/覆被变化与蒸散量时空特征分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(3): 340-347.]
- [35] Wang Quanquan, Wang Hang, Zhang Weiguo, et al. The correlations between wetland landscape and social-natural factors on northwestern Yunnan Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(2): 726-738. [王泉泉, 王行, 张卫国, 等. 滇西北高原湿地景观变化与人为、自然因子的相关性研究[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 726-738.]
- [36] Yang Fan, Li Yanze, Guo Xiaoya, et al. Correlation between landscape types and soil factors of coastal wetlands in Laizhou Bay [J]. *Ecological Science*, 2018, 37(4): 86-96. [杨帆, 李雁泽, 郭小雅, 等. 莱州湾滨海湿地景观类型与土壤因子相关性研究[J]. 生态科学, 2018, 37(4): 86-96.]
- [37] Jin Jiali, Wang Cheng, Jia Baoquan. Coupling analysis of landscape pattern and thermal fields after the afforestation in Beijing plain area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(11): 3723-3734. [金佳莉, 王成, 贾宝全. 北京平原造林后景观格局与热场环境的耦合分析[J]. 应用生态学报, 2018, 29(11): 3723-3734.]

Variation characteristics of actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis and its relationship with landscape pattern

ZHANG Anhe^{1,2,3}, DING Jianli^{1,2,3}, ZHANG Junyong^{1,2,3}, DONG Yu⁴

(1. Key Laboratory of Smart City and Environment Modelling of Higher Education Institute, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 3. Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China; 4. College of Geographical Sciences and Tourism, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: Based on the Budyko curve equation, we calculated interannual and seasonal variation characteristics of actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis from 1960 to 2013. The four remote sensing images of the study area were selected for land use/cover classification, and the landscape pattern index was calculated with Fragstats 4.2. The relationship between actual evapotranspiration and landscape pattern index shows that: The average actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis is 162.97 mm, which was an upward trend with a tendency rate of $7.76 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$; the actual evapotranspiration in summer and autumn was an upward trend, while the spring was a downward trend; the mutation in abrupt increase of annual actual evapotranspiration occurred in 1987. As to the seasonal mutation, the abrupt increase of summer and autumn occurred in 1992 and 1975, respectively. However, the actual evapotranspiration in spring did not exhibit mutation. The four periods of land use/cover map show that desert was dominated in the Ebinur Lake oasis, which was more than 50% in area, while cultivated land and urban land had a significant increase, which reached to 409.69% and 704.56%, respectively. Landscape pattern indices showed a significant difference at patch types level, and all landscape pattern indices showed a fluctuate increase at landscape level. At patch types level, the significant correlations were only observed among the actual evapotranspiration with water NP and PD, the correlation coefficient were both -0.981 ($P < 0.05$); at landscape level, a negative relationship was observed among the actual evapotranspiration with LPI, CONTAG and COHESION, while a reverse one was among the NP, PD, IJI, SHDI and AI. The largest correlation coefficient was 0.953 ($P < 0.05$) between the actual evapotranspiration and AI, while the two lowest correlation coefficient both were 0.148 occurred at NP and PD. This indicated that the AI index can better characterize the variation of the actual evapotranspiration in the Ebinur Lake oasis.

Key words: oasis; Ebinur Lake; actual evapotranspiration; landscape pattern

(责任编辑: 陈亚宁; 编辑: 武俊杰)