

玛纳斯流域生态需水变化与景观格局的响应关系研究

姜亮亮^{1,2}, 包安明¹, 刘海隆³, 李均力¹, 常存¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 新疆环境保护科学研究院

新疆环境污染监控与风险预警重点实验室, 乌鲁木齐 830011; 3. 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000)

摘要:选取西北干旱区水土开发的典型区域玛纳斯河流域为研究对象, 基于遥感和GIS技术, 与气象站点实测资料相结合, 采用FAO56 Penman-Monteith法, 在ArcGIS建好彭曼模型计算研究区生态需水。利用TM数据解译出1990年、2000年、2010年3期土地利用分类图对玛纳斯河流域进行景观生态学研究, 最后尝试性分析生态需水与景观格局关系。结果表明: (1) 各区域生态需水变化趋势存在差异, 主要表现在山区生态需水增加, 平原区生态需水减少。景观格局分析发现2000—2010年中部平原的西面和北面成片出现连通现象, 是生态环境恶化较为严重区域。(2) 空间上, 山区生态耗水量增加, 植被多样性指数上升, 蔓延度指数下降。时间上, 生态耗水量增加, 周边的蔓延度指数上升, 多样性下降; (3) 空间上, 绿洲景观格局指数变化与生态需水定额无明显关系, 时间上, 生态需水定额减小, 但在人类活动影响下, 周边的景观连通性下降, 多样性上升, 与山区的结论相反。生态需水定额的减少, 将有利于植被的生长, 但由于人类活动的影响, 生态环境遭到破坏。

关键词:玛纳斯河流域; 生态需水; 景观格局; 遥感; GIS

中图分类号:TV214; P901

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)03-0143-07

Study on the Reponses Relationship Between Ecological Water Requirement and Landscape Pattern in Manas River Basin

JIANG Liangliang^{1,2}, BAO Anming¹, LIU Hailong³, LI Junli¹, CHANG Cun¹

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences,

Urumqi 830011, China; 2. Xinjiang Key Laboratory for Environmental Pollution Monitoring and

Risk Warning, Xinjiang Academy of Environmental Protection Science, Urumqi 830011, China; 3. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: The typical region of Manas River Basin, which is dramatic exploitation and use of water and land resources in the arid area of the northwestern of China, was chosen. Based on GIS and RS technology, the observed weather data and FAO56 Penman-Monteith method, we calculated the ecological water requirement in the study area. We carried out landscape ecology research using three periods of land use patterns abstracted from TM data in 1990, 2000 and 2010 in Manas River Basin. Finally, this paper analyzed the relationship between ecological water requirement and the landscape pattern tentatively. The results showed that: (1) the spatial change trend was different, ecological water requirement would increase in the mountains, and reduce in the plain area, and the connected phenomenon appeared in the oasis of the west and north under landscape pattern analysis during the period from 2000 to 2010, the ecological environment would be destroyed; (2) in the mountains area, the increase of ecological water consumption resulted in the vegetation diversity index increase and contagion index decrease in the space, also, it caused the surrounding contagion index increase and diversity decrease with time; (3) in the oasis, there is no obvious relationship between ecological water demand quota and landscape pattern index in space. The ecological water consumption increased, however, the impact of human activities resulted in the surrounding contagion index decrease and diversity increase with time, which is in contrast to the conclusions of the mountains. Reduction of ecological water requirement quota would be conducive for the growth of vegetation. Otherwise, the ecological environment would be destroyed because of the influence of human activity.

Keywords: Manas River Basin; ecological water requirement; landscape pattern; RS; GIS

位于天山北坡的核心经济开发区——玛纳斯河流域,光、热以及水资源都比较充足,属于大陆性气候,有利用农牧业的发展。经过 50 多年的建设,流域的耕地面积由原来的 1.3 万 hm^2 增加到现在的 26.7 万 hm^2 ,农业用水占流域可用水总量的 90% 以上^[1],尽管现在流域内普遍采用节水灌溉技术,但节约下来的水也不能满足新的土地开发所需要的水,这种发展趋势使经济用水和生态用水产生矛盾,会出现农业用水挤占生态用水,上游用水挤占下游用水的现象,生态需水将得不到满足,对区域内生态环境造成严重的影响。玛纳斯湖的逐渐萎缩,许多珍稀的沙漠物种随之消失。石河子绿洲边缘的生态环境日趋恶化,水土流失严重,沙尘暴天气屡屡发生,给人民身体和生活造成了很大的损失^[2-4]。继而导致流域草地和未利用土地的优势逐渐减小,耕地的优势逐渐上升,景观多样性升高,优势度下降,趋于分离、破碎化方向发展^[5-6]。因此,对玛纳斯河流域生态需水及景观格局的研究是十分必要的。因而开展生态需水与景观格局的研究,明确生态需水的变化与景观格局的关系,以便对重点区域生态需水和景观格局进行评估,有利于流域的后期规划与管理中,加强对生态环境恶化的区域保护。对确定合理的生态需水量,实现水资源的优化配置和生态环境的可持续发展具有重要意义,尤其在干旱与半干旱地区^[7-11]。

基于以上几点思考,本论文以玛纳斯河流域为研究区,利用 TM 数据解译出的 1990 年、2000 年、2010 年 3 期土地利用分类图对玛纳斯河流域进行景观生态学研究,分析玛纳斯河流域景观格局的时空演变特征。基于遥感和 GIS 技术与气象站点实测资料相结合,采用 FAO56 Penman-Monteith 法,在 ArcGIS 建模计算研究区生态需水^[12],然后分析玛纳斯流域生态需水与景观格局的关系。将为流域水资源的高效利用、经济建设与生态环境建设同步发展提供依据和指导,同时为全疆生态需水与景观格局研究提供可靠的技术借鉴。

1 研究区概况与数据

该流域属于典型的大陆性气候,夏季炎热冬季寒冷,年均气温 6.8°C ,年降水量在 $110\sim 200\text{ mm}$ 。流域总面积 8.432 万 km^2 ,截止到 2010 年人口数达到 99.73 万人。下游的洪积冲积扇平原容易被人类加以改造利用。近几十年,随着环境变化、人口不断增长、经济快速发展,植被的生态需水量和景观格局都

发生了较大变化^[13-14]。流域经过多年的水资源开发,有利于耕地扩张、景观格局的改变。现在玛纳斯河流域是中国第四大灌溉农业区^[1]。

本文采用研究区及周边 29 个气象站点和 19 个水文站点的数据。其中 29 个气象站点数据在中国气象服务网下载获得,时间为 1990 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日,数据内容包括各站点的经度、纬度、海拔、逐日的气温、降水量等。天山中段 19 个水文站点的数据(降水、气温、径流量等)来源于水文资料。

采用玛纳斯河流域土地利用数据时间跨度为 1990—2010 年,共分为 3 个时间段:1990 年、2000 年、2010 年,均由分辨率为 30 m 的 Landsat TM 遥感影像解译而成,遥感影像在美国地质调查局官网下载;玛纳斯流域边界的提取主要采用 SRTM DEM 高程数据产品(空间分辨率约 90 m)^[15],与《中国新疆河湖全书》中玛纳斯河区边界基本吻合;将研究区不同轨道号影像(表 1)在 ENVI 里预处理、拼接、裁剪,最后得到玛纳斯河流域 3 期的 Landsat TM 遥感影像(附图 6)。

表 1 3 期 Landsat TM 数据时像

WRS-2 轨道		1990s	2000s	2010s
143	29	19890818	20000808	20100804
143	30	19890818	20000808	20100804
144	27	19890809	20000807	20100827
144	28	19890809	20000807	20100827
144	29	19890809	20000807	20100811
144	30	19890809	20000807	20100811
145	27	19890807	20000814	20100802
145	28	19890807	20000814	20100802

2 研究方法

2.1 生态需水计算方法

植被生态需水量是指维持植被正常生长所必需消耗的水量,植被包括山区的天然植被和绿洲的植被^[16]。考虑到研究区在干旱区,天然植被生态需水量主要受到植被类别、土壤水分以及气候要素的影响,采用 FAO 提出的植被生态需水量计算方法,该方法基于遥感解译出的各类天然植被的分布,同时还需要计算潜在蒸散量(ET_0)^[17]、土壤水分限制系数(K_s)和植被系数(K_c)。

$$\text{ET} = \text{ET}_0 \cdot K_c \cdot K_s \cdot A_p \quad (1)$$

式中:ET——植被生态需水量; ET_0 ——天然植被的潜在蒸散量,由气候条件决定,根据改进后的 Penman-Monteith 公式计算; K_c ——植被系数,与植被种类和生长阶段有关; K_s ——土壤水分限制系数,与土壤中的水量和土壤种类及相关; A_p ——不同植

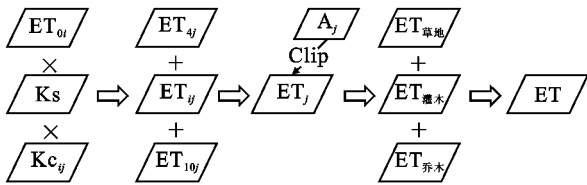
被类型面积。

FAO56 Penman-Monteith 法,考虑到了气象要素对植被潜在蒸散量的影响,将水汽扩散理论和能量平衡理论相结合,计算公式如下:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) - \gamma \frac{900U_2(e_s - e_a)}{T + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (2)$$

式中: Δ ——温度与饱和水汽压形成的曲线斜率($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); γ ——干湿表常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); G ——土壤热通量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; R_n ——植被表面净辐射量 [$\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$]; e_a , e_s ——实际和饱和水汽压 (kPa), U_2 ——在高 2 m 处的平均风速 (m/s), T ——平均温度 ($^\circ\text{C}$)。在逐日尺度下计算时,植被表面的土壤热通量值很小^[17],可忽略。因此,计算时可取为 0,式中其他相关参数的计算详见参考文献^[17]。

植被生态需水量的计算根据以下计算流程(图 1),在 ArcGIS 10.1 里建好模型,输入可变量,理顺逻辑关系,最终得到所需要的结果。



注: i 为生长期各月(4,5,6,7,8,9,10月); j 为各种植被类型(草地、灌木、乔木)。

图 1 流域生态需水计算模型流程

如图 1 所示,算出单位面积植被生态需水量 ET ,结合 4—10 月的有效降雨量 P_e ,可得出各类植被生育期内单位面积上的生态缺水量,计算公式如下:

$$Q = ET - \alpha \times P \quad (3)$$

式中: P ——站点实测降雨量; α ——降雨入渗系数,当一次降雨小于 5 mm 时, $\alpha = 0$; 当一次降雨 5~50 mm 时, $\alpha = 1$; 当一次降雨大于 50 mm 时, $\alpha = 0.7 \sim 0.8$ 。由于研究区在干旱区,降雨不会很大,故 α 取 1。

2.2 景观指数计算方法

对玛纳斯河流域景观格局分析前,首先采用 eCognition 软件中面向对象多尺度影像分析的方法对 3 期 Landsat 遥感影像进行解译,解决了传统手工解译工作量较大且难以统一地物类别边界的问题,也在一定程度上解决了类别属性的标示问题,另外,多尺度分析方法正好符合真实地物类别的多尺度空间分布特征,使得分类结果更加具有现实意义。

对解译出的土地利用分类数据进行处理,利用 Fragstats 3.4 软件计算出多样性指数 (SHDI) 和蔓延度指数 (CONTAG) 空间分布的栅格图^[18]。

(1) 香农多样性指数是景观格局分析中重要的

指数之一,SHDI 是一个敏感的指标,尤其是在分析不同类型的景观和不同时期的整体景观的变化方面。研究区的土地利用程度与破碎度程度呈正比,越高则计算出的香农多样性指数也就越大。

$$SHDI = - \sum_{i=1}^m \left(\frac{A_i}{A} \ln \frac{A_i}{A} \right) \quad (4)$$

式中: SHDI——香农多样性指数; A_k ——第 k 个景观类型的面积; A_i ——第 i 类景观类型面积; A ——研究区域总面积; m ——景观类型个数。

(2) 蔓延度指数是描述景观类型的空间信息,蔓延度高的区域,说明了景观中某种类型占主导地位,有很好的连通性,反之,则表示景观是由多种景观类型控制,景观趋于破碎化,蔓延度偏低。

$$CONTAG = \left[1 + \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \left[(P_i) \left(\frac{g_{jk}}{\sum_{k=1}^n g_{jk}} \right) \right] \cdot \left[\ln(P_i) \frac{g_{jk}}{\sum_{k=1}^n g_{jk}} \right]}{2 \ln(m)} \right] \times 100\% \quad (5)$$

式中: CONTAG——蔓延度指数; n ——同一类型中所有斑块数目; p_i ——第 i 类景观类型占整个景观面积的比例; g_{jk} ——第 i 类景观类型中第 k 个斑块的象元相邻的数量。

3 结果与分析

3.1 流域生态需水与景观格局演变

利用上述计算得出的生态需水的空间分布图,与 MODIS 数据反演的 ET 对比,发现二者的差距为 $-3\% \sim 3\%$,说明本文计算的生态需水比较合理,虽然有一点的误差,但对开展大尺度的研究影响很小。借助 ArcGIS 10.1 软件中空间分析工具对 3 期空间分布图进行后一期数据减前一期数据运算便可得到生态需水动态变化图(图 2)。

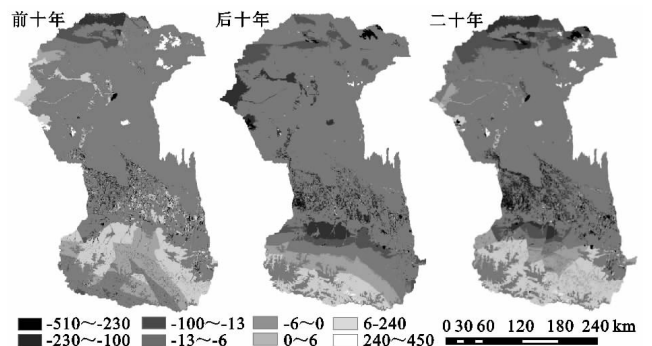


图 2 1990—2010 年流域天然植被生态需水变化

图 2 能够更加直观反映天然植被生态需水的变化,从空间上看,南部山区生态需水主要以增加为主,而中部平原区呈相反的趋势,北部荒漠区,大部分区域是戈壁和沙漠,变化值为 0。出现较大或较小值表示植被的增加和减小。从时间上看,前十年的变化剧

烈程度显然要大于后十年,整体的变化趋势存在差异,1990—2000 年山区两边生态需水增加幅度大于中间,平原区中部也有所增加,可以看到有一些白色的斑块。而 2000—2010 年山区梯度性变化,自南向北逐渐由增加变为减少,平原区西边区域减少得尤为明显。总之,20 a 里,以山区和平原区变化趋势相反为特点,由南向北,逐渐由增加变为减少。

由 1990—2010 年流域景观格局时空演变特征(附图 7)可以看出:自南向北景观格局呈现明显的梯度差异,平原区变化最大,其次是北部荒漠区,山区差异性很小,下文对各部分进行简要叙述。

北部荒漠区景观以未利用土地、草地和零星的盐碱地为主,受水资源影响很大,由于流域下游的来水减少,地下水位降低,整体景观逐渐由异质和不连续的斑块变化为均质和连续的斑块,生物多样性降低,使得多样性指数降低,而蔓延度指数升高,北部人口少,城镇化水平较低,景观格局主要受上游用水以及自然条件控制;中部平原区的景观以耕地为主,景观逐渐趋于复杂,不连续,上部的 150 团、149 团及 148 团变化明显,但在 2010 年,西面和北面成片出现连通现象,主要是耕地以家庭农场为主的开垦热潮,集中化生产;南部为天山中段一部分,山区景观类型以草地、林地、未利用土地和永久冰川雪地为主,该区域多由离散和形状较不规则的小斑块构成,破碎化程度较高,连通性较低,整体上山区景观变化差异很小;此外,景观格局指数出现不同程度的圈状和带状结构特征是由于连续的河流和离散的水库、湖泊镶嵌在整个流域景观类型中导致的。

3.2 生态缺水评价

为了明确流域不同区域的生态需水的满足情况,以 2010 年数据为例,首先了解植被生态缺水的空间分布。

由图 3 可知,南部和中北部呈现出两种完全不同

的分布,降雨能够满足山区的植被生态需水量,其他区域都出现不同程度的生态缺水,北部缺水最严重,那么生态需水的满足与不满足区域,生态需水变化与不同区域景观格局的关系可能不同。依据图 3 和人类活动强弱,选取生态缺水不同的两个典型区,一个是上游的山区,另一个是以新湖总厂、芳草湖总厂和 106 团为整体的绿洲。

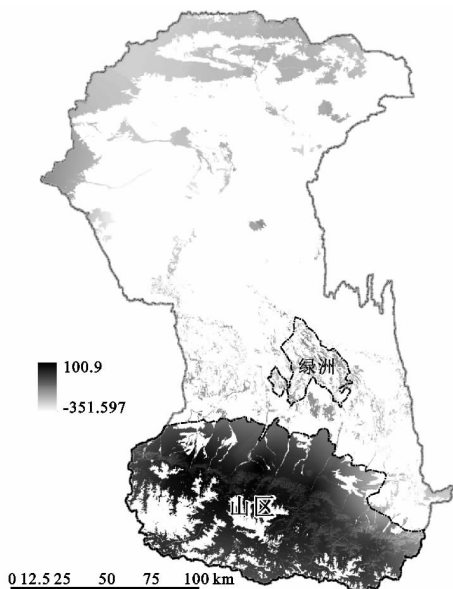


图 3 2010 年流域生态缺水分布情况

3.3 植被生态需水与景观格局关系

3.3.1 山区 山区植被主要包括草地和林地,气候湿润,降雨充沛,人类活动小,大部分区域不存在生态缺水情况,所以,山区天然植被的生态需水量近似等于生态耗水量。

分析上游山区生态需水与景观格局的时空演变特征的关系,明确空间上生态需水量与景观指数的关系,以 2010 年数据为例,利用上述公式计算景观格局指数空间分布的栅格数据和生态需水空间分布图(图 4),在 ArcGIS 里随机取点,用空间分析工具在图 5 中的数据中取值统计分析,研究二者的关系。

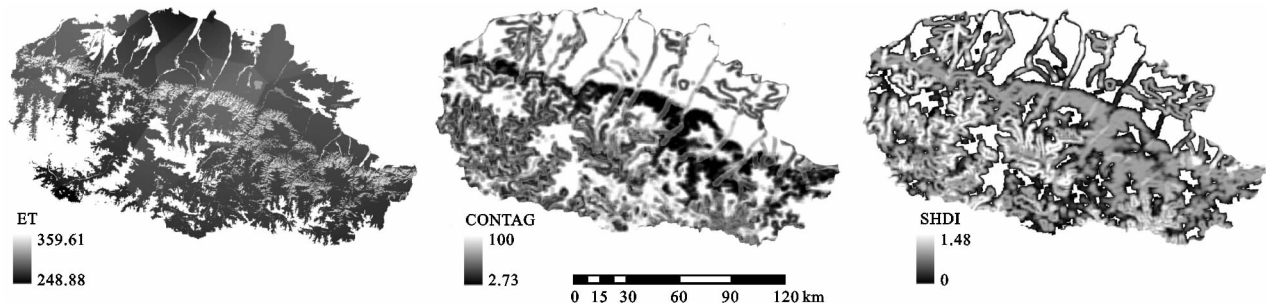


图 4 山区植被生态需水与景观格局指数空间分布

根据取出的值,作散点图如图 5 所示,从图中分析可以得出:(1)生态需水在 260~300 mm 区间,聚集的点最多,其次是在 330~360 mm 区间,由于草地的面积占

到整个山区面积的 90%,且草地的生态需水定额要小于乔木和灌木,显然聚集点多的区间是草地,山区中的林地大部分是乔木和少量的灌木,所以在 330~360 mm 区

间的是乔木,介于二者之间的是灌木;(2) 山区中不同区域的景观格局差异也很大,不同类型的植被也不同,山区大部分草地是单一、均质和连续的整体,使该区域的农香多样性指数较低,蔓延度指数偏高,其中草地区域的离散点出现上下接近一条直线,这与山区存在大面积的连通草地有关,从而出现多样性指数等于 0,蔓延度指数等于 100 的现象。而乔木的景观格局与草地相反,景观复杂、异质和不连续的斑块镶嵌体,乔木周围的香农多样性指数偏高,蔓延度指数偏低,灌木介于二者之间;(3) 本文的取点是随机的,空间上有着随着生态耗水定额的增加,植被多样性指数上升,蔓延度指数下降的趋势,生态需水定额增加,植被对地形、地质等生长要素要求高,就会出现很多不连续的植物,从而导致蔓延度下降,多样性上升的趋势。

从时间上看,同一区域的生态耗水定额发生变化可能对周围景观格局产生影响,为此,本文利用 1990 年和 2010 年两期山区数据,对两期的生态需水和景观指数的栅格数据分别作差取值,分析两者的变化。

由图 6 可以看出,很多点集中在横坐标上,说明随着生态耗水的变化,山区很多区域的景观没发生很

大改变,自然性的改变还是很小;生态耗水的变化区间主要集中在-20~20 mm,横坐标轴两端出现生态耗水变化幅度大的,可以判断出前者是草地的生态耗水变化区间,后者是林地的,草地生态耗水的变化对景观格局的影响要大于林地;生态耗水增加与减少,对景观格局的变化有着不同的影响,导致点在图上的分布区域不同,从变化趋势上得出,生态耗水的增加,周边的景观连通性上升,多样性下降,反之,亦然,生态需水增加的区域要大于减少的,这将有利于山区植被朝健康的方向发展,总之,从时间上看,山区的大部分植被的生态耗水量增加,景观多样性指数下降,蔓延度指数上升。

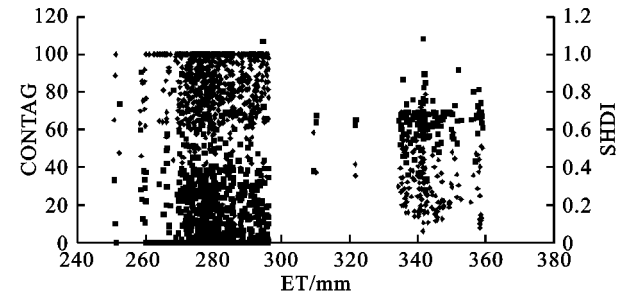


图 5 山区生态需水与景观指数关系

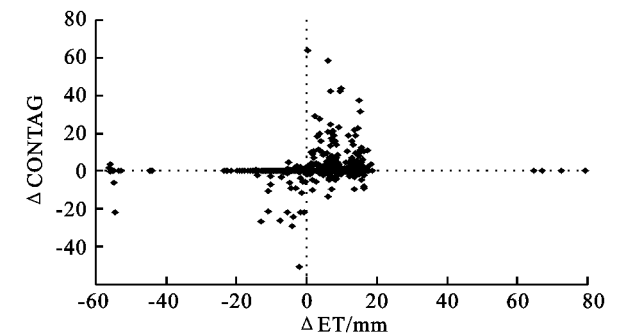


图 6 山区生态需水变化与景观格局变化

3.3.2 绿洲 同样以 2010 年数据为例,从空间上,研究区绿洲生态需水与景观格局的空间演变特征关系,研究区景观格局香农多样性指数(SHDI)与蔓延度指数(CONTAG)空间分布的栅格数据和生态需水

空间分布见图 7。

在天然植被区域随机取点,然后在香农多样性指数(SHDI)与蔓延度指数(CONTAG)空间分布的栅格数据取值进行统计分析。

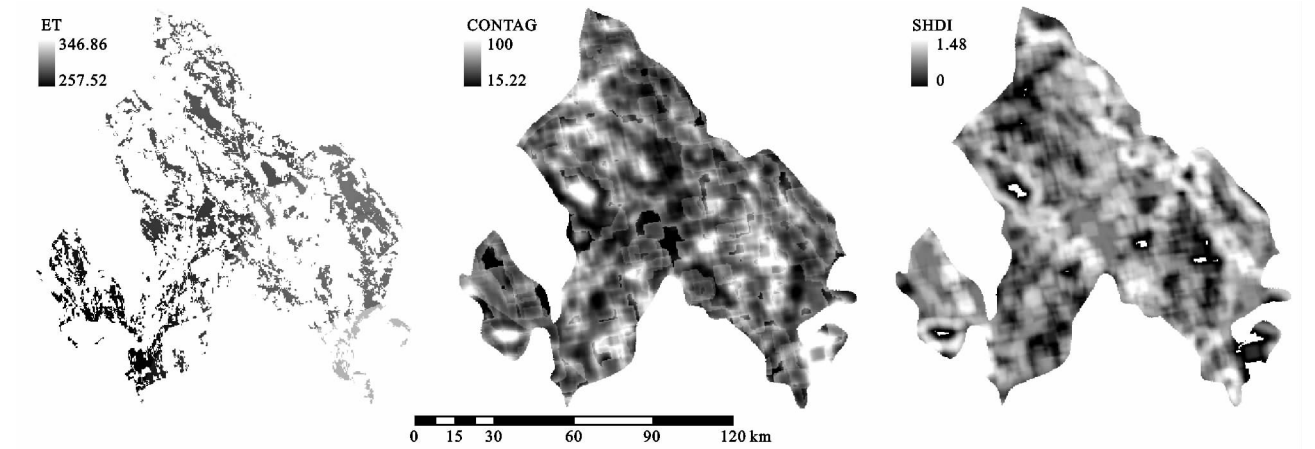


图 7 绿洲植被生态需水与景观格局指数空间分布

根据取出的值,作散点图(图8),分析得出:(1)生态需水量在290 mm左右是明显的分界线,生态需水在260~285 mm区间,聚集的点最多,其次是在295~306 mm区间,由于草地的面积占到整个山区面积的95%以上,且草地的生态需水定额要小与林地,显然聚集点多的区间是草地,在295~306 mm区间的是林地;(2)平原区不同的植被类型,在空间上并不存在很大差异,草地和林地的蔓延度指数都在50左右,香农多样性指数都在0.8左右,这也有别于山区景观格局。(3)在空间上,景观格局指数变化与生态需水定额的关系不显著。大小相同的生态需水,景观指数的大小,与周围人类活动强度有密切的关系,开发程度高,多样性指数偏高,蔓延度偏低,反之亦然。

同样利用1990年和2010年两期数据,对两期的生态需水和景观指数的栅格数据作差取值,分析两者在时间上的变化。

由图9可知,20 a期间,大部分区域生态需水都在减小,草地的变化范围在-17~0 mm,而林地减少量在30 mm左右。相比山区景观格局,绿洲变化剧烈的多,大多数区域的多样性上升,连通度下降,人类活动对景观格局的改变要远大于山区自然的变化;从纵坐标聚集的点看出即使植被生态需水量没有变化

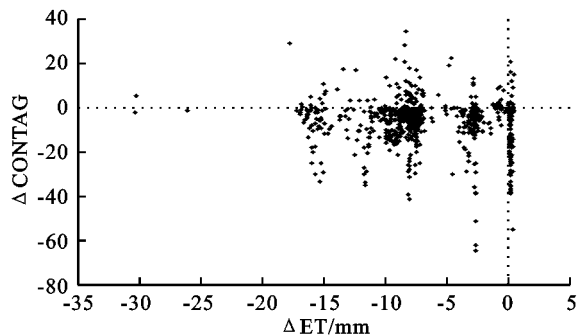


图9 绿洲生态需水与景观指数关系

4 结论与讨论

本文基于遥感与GIS技术和实测资料相结合,分别研究了流域3期生态需水与景观指数空间分布,了解整个流域的生态缺水情况,然后在满足与不满足生态需水区域分别选定两个小研究区对比研究分析,从空间和时间上,分析生态需水变化与景观格局演变的关系。

(1)各区域植被生态需水和景观格局变化存在差异,山区和平原区生态需水变化趋势相反,由南向北,逐渐由增加变为减少,前十年的变化幅度明显大于后十年。荒漠区景观逐渐趋向于单一、均质和连续的整体,中平原区以耕地为主,景观逐渐趋于复杂,不连续,但2000—2010年西面和北面成片的出现连通

的区域,景观格局也发生了很大的改变;根据点的分布特征看出生态需水定额减少,周边的景观连通性下降,多样性上升,但绿洲中天然植被存在生态缺水,生态需水不能视为生态耗水,加上人类土地的开发利用,所以与山区的结论相反,因此,绿洲的景观格局变化主要受人类活动的影响,生态需水定额的减少,如果没有人类的干扰和可供的生态用水不变,那么植被的生长状况会越来越好,但实际的景观格局变化,反映出植被面积的减少,连通度下降,多样性上升,大量的草地被占用,生态环境逐渐恶化。总之,在人类活动的影响下,生态需水定额减少,周边的景观连通性下降,多样性上升。

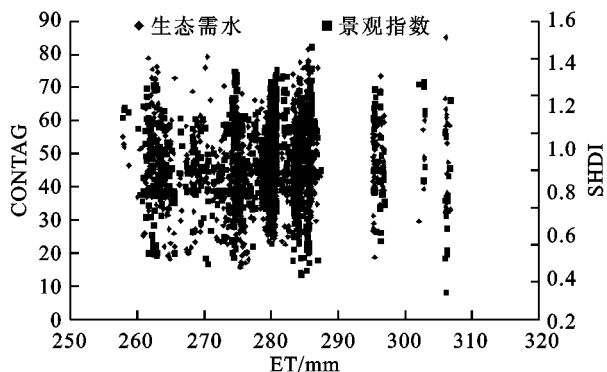
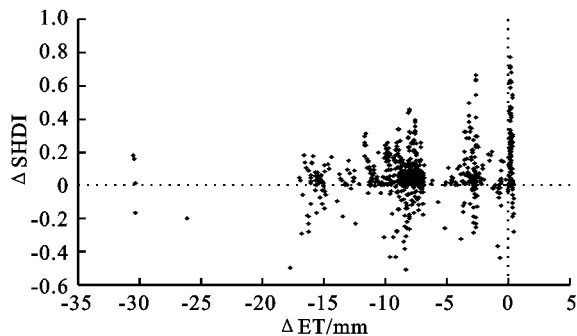


图8 绿洲生态需水与景观指数关系



现象。山区的草地和永久冰川雪地四周破碎化程度逐渐升高,连通性降低。

(2)生态缺水评价中看出,南部和中北部呈现出两种完全不同的分布,南部山区降雨能够满足山区植被的生态需水,而其他区域都出现不同程度的生态缺水,北部缺水最严重。

(3)山区生态需水变化与景观格局关系:山区草地香农多样性指数较低,蔓延度指数偏高,而乔木香农多样性指数偏高,蔓延度指数偏低,乔木介于二者之间。空间上,生态耗水量增加,植被多样性指数上升,蔓延度指数下降。时间上,生态耗水的增加,周边的景观连通性上升,多样性下降。

(4)绿洲生态需水变化与景观格局关系:空间上,景观格局指数变化与生态需水定额的变化关系不

显著,时间上,生态需水定额减少,但在人类活动影响下,景观连通性下降,多样性上升。与山区的结论相反,生态需水定额的减少,将有利于植被的生长,但由于人类活动的影响,朝不平衡方向发展。

参考文献:

- [1] 冯异星,罗格平,周德成,等.近50 a土地利用变化对干旱区典型流域景观格局的影响:以新疆玛纳斯河流域为例[J].生态学报,2010,30(16):4295-4305.
- [2] 程维明,周成虎,李建新.新疆玛纳斯湖景观演化及其生态环境效应[J].第四纪研究,2001,21(6):560-565.
- [3] 姚永慧,汪小钦,周成虎,等.新疆玛纳斯湖近50 a来的变迁[J].水科学进展,2007,18(1):17-23.
- [4] 姚永慧,励惠国.新疆玛纳斯湖演化的地貌特征[J].干旱区研究,2010,27(1):57-63.
- [5] 陆晴,刘丽娟,王玉刚,等.新疆三工河流域农业绿洲近30 a景观格局变化及其驱动力[J].生态学杂志,2013,32(3):748-754.
- [6] 张飞,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等.干旱区绿洲土地利用/覆被及景观格局变化特征:以新疆精河县为例[J].生态学报,2009,29(3):1251-1263.
- [7] Richter B D, Mathews R, Harrison D L, et al. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity[J]. Ecological Applications, 2003, 13(1): 206-224.
- [8] 范文波,周宏飞,李俊峰.玛纳斯河流域生态需水量估算[J].水土保持研究,2010,17(6):242-251.
- [9] 何京丽.半干旱区草原植被建设生态需水相关问题的探讨[J].水土保持研究,2006,13(6):271-275.

- [10] Cai X, Rosegrant M W. Optional water development strategies for the Yellow River Basin: Balancing agricultural and ecological water demands [J]. Water Resources Research, 2004, 40(8): 1-29.
- [11] Covich A P, Palmer M A, Crowl T A. The role of benthic invertebrate species in freshwater ecosystems: Zoobenthic species influence energy flows and nutrient cycling[J]. BioScience, 1999, 49(2): 119-127.
- [12] 段晋芳,郭青霞,解鸿志.基于GIS的山西永定河植被生态需水管理系统的研建[J].水土保持研究,2011,18(1):254-258.
- [13] 刘明,王克林.洞庭湖流域中上游地区景观格局变化的水文响应[J].生态学报,2008,28(12):5970-5979.
- [14] 刘明,王克林.洞庭湖流域中上游地区景观格局变化及其驱动力[J].应用生态学报,2008,19(6):1317-1324.
- [15] Wang D, Hao Z, Xiong Z. Modified method for extraction of watershed boundary with digital elevation modeling[J]. Journal of Forestry Research, 2004, 15(4): 283-286.
- [16] 吴洁珍,王莉红,王卫军,等.生态环境建设规划中引入生态环境需水的探讨[J].水土保持研究,2005,12(1): 59-62.
- [17] Allen R G, Pereira L S, Smith M, et al. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2005, 131(1): 2-13.
- [18] 宫继萍,石培基,杨雪梅,等.干旱区内陆河流域景观格局及其与环境因子的关系研究:以石羊河流域为例[J].土壤,2013,45(1):143-151.

(上接第142页)

- [4] 武胜利.新疆和田河流域灌(草)丛沙堆发育机制研究[D].上海:华东师范大学,2007.
- [5] 王乐,李改欣,王仁德,等.半干旱区农田灌丛沙堆形态及沉积特征[J].水土保持研究,2014,21(1):76-80.
- [6] 王翠,雷加强,李生字,等.新疆策勒绿洲—沙漠过渡带花花柴(*Kareliniacaspica*)沙堆的形态特征[J].中国沙漠,2013,33(4):981-989.
- [7] 韩磊,张媛媛,马成仓,等.狭叶锦鸡儿(*Caraganastenophylla*)灌丛沙堆形态发育特征及固沙能力[J].中国沙漠,2013,33(5):1305-1309.
- [8] 韩磊,张媛媛,解李娜,等.狭叶锦鸡儿和小叶锦鸡儿灌丛沙堆的形态和发育及灌丛固沙能力的比较研究[J].天津师范大学学报:自然科学版,2012,32(3):65-70.
- [9] 张媛媛.内蒙古局原锦鸡儿属植物灌丛沙堆的初步研究

[D].天津:天津师范大学,2012.

- [10] 李万娟.新疆艾比湖周边怪柳沙堆特征初步研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2009.
- [11] 穆桂金.塔克拉玛干沙漠灌草丘的发育特征及环境意义[J].干旱区研究,1994,11(1):34-41.
- [12] 路端正.和田河沿岸植被与生态环境[J].北京农学院学报,1994(2):153-160.
- [13] 白彬.基于GPS与GIS的艾比湖流域灌丛沙堆空间格局分析[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2008.
- [14] 彭飞,王涛,刘立超,等.民勤荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆演化阶段及其空间格局[J].中国沙漠,2012,32(3):593-599.
- [15] 孙秋梅.和田河流域灌丛沙堆形成动力机制风洞实验研究[D].乌鲁木齐:新疆师范大学,2007.