

新疆不同土地利用类型 WUE 的时空变化及其对气候因子的响应

孙琪^{1,2}, 徐长春^{1,2}, 罗映雪^{1,2}, 楚智^{1,2}

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2.新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046)

摘要:水分利用效率(WUE)是衡量植被耗水能力的重要指标。利用 MODIS 产品并结合土地利用类型和气象数据,对 2001—2014 年不同土地利用类型下的植被水分利用效率的时空变化特征及其对气候因子的响应进行了研究。结果表明:(1)从空间上看,相较于其他土地利用类型,耕地年均 WUE 绝大部分区域在 $1.2 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 以上,而未利用地年均 WUE 基本处于 $0.6 \sim 1.2 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$,集中分布在准噶尔盆地。(2)2001—2014 年新疆地区各土地利用类型 WUE 整体上呈增加趋势,其中沼泽 WUE 增加比较显著。(3)新疆地区草地和未利用地月均 WUE 呈现出先增高后降低的“单峰型”分布格局,而沼泽和耕地年内 WUE 都呈现出“双峰型”分布格局。林地年内 WUE 在 5—9 月份变化较小。(4)从整体上看,各土地利用类型 WUE 与降水、平均风速和平均湿度呈显著负相关的区域要明显大于显著正相关的区域,而日照时数则相反。除未利用地之外,其他土地利用类型 WUE 与气温呈显著正相关性的区域要明显大于显著负相关性的区域。

关键词:土地利用类型; WUE; 气候因子; 新疆

中图分类号:Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0237-07

Spatiotemporal Variation of WUE of Different Land Use Types and Its Response to Climate Factors in Xinjiang

SUN Qi^{1,2}, XU Changchun^{1,2}, LUO Yingxue^{1,2}, CHU Zhi^{1,2}

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

China; 2.Key Laboratory of Oasis Ecology, ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830046, China)

Abstract: Water use efficiency (WUE) is an important index to measure the water consumption capacity of vegetation. In this paper, the spatial-temporal change characteristics of vegetation WUE and its response to climate factors under different land use types in the period 2001—2014 were studied by using MODIS products and combining with land use types and meteorological data. The results show that: (1) in terms of space, compared with other land use types, the annual WUE of cultivated land was more than $1.2 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$, while the annual WUE of unused land was basically between $0.6 \sim 1.2 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$, which concentrated in Jungar Basin; (2) from 2001 to 2014, WUE of various land use types in Xinjiang showed an overall increasing trend, among which WUE of swamp increased significantly; (3) WUE of grassland and unused land in Xinjiang showed a ‘single peak’ distribution pattern with increasing first and then decreasing, while WUE of swamp and cultivated land showed a ‘double peak’ distribution pattern in the year, WUE of woodland changed little from May to September; (4) as a whole, the area with significant negative correlation between WUE and precipitation, average wind speed and average humidity was significantly larger than the area with significant positive correlation, while the sunshine hours are opposite to these relations; except the unused land, the area with significant positive correlation between WUE and air temperature was significantly larger than the area with significant negative correlation.

Keywords: land use types; WUE; climatic factors; Xinjiang

植被水分利用效率 (Water Use Efficiency, WUE) 是指单位面积内植被每蒸散 1 mm 水所能固定的有机碳的质量 [$\text{gC}/(\text{mm H}_2\text{O} \cdot \text{m}^2)$]。它是陆地生态系统响应全球变化的重要参数,也是水—碳循环间耦合关系的重要指标^[1-3]。在全球气候变暖和生态系统退化不断加重的背景下,进一步了解 WUE 可使模拟和预测碳水循环的能力得到提高,并有利于实现水资源的优化管理^[4]。WUE 的计算可以分为两部分,一部分是单位面积内消耗的水分,其中包括单位面积上植被的蒸腾所消耗的水分和单位面积土壤蒸发所损失的水分,两者相加就是所消耗的水分,即蒸散发 (Evapotranspiration, ET)^[5-6]。另一部分是单位面积内植被所固定的有机碳的质量,即干物质的量,一般最常用的表达方式有两种,总初级生产力 (Gross Primary Productivity, GPP) 和净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP),前者是指一定时间内绿色植物把无机物质合成为有机物质的总数量或固定的总能量,后者是指在一定时间内除去绿色植物呼吸所消耗的那一部分有机物或能量外,其所合成有机物的数量或固定的能量^[5-10]。

根据研究对象的不同, WUE 研究涉及到个体、群体、生态系统、流域、区域等多个尺度^[11-15],如:王云霓等 (利用热扩散技术、微型蒸渗仪、树干径向变化记录仪及文献资料等方法) 分析了宁夏六盘山地区 3 种典型植物群落 WUE 的季节变化特征^[16];邹杰等利用遥感影像数据对中亚及新疆生态系统的 WUE 时空变化进行了分析^[17];李肖娟等利用 (MODIS) 产品数据中的 GPP, ET 对黑河流域的 WUE 进行了估算,并对其时空分布变化进行了分析^[18];张远东等应用生态系统模型 CEVSA (Carbon Exchange between Vegetation, Soil, and the Atmosphere) 对西南高山地区的 WUE 进行了估算并分析了高山地区长时间尺度的 WUE 时空变化^[19]。近年来,受全球气候变暖的影响,国内外学者对 WUE 的研究开始广泛集中于 WUE 对气候变化的动态响应^[20-22]。XUE 等^[23]研究了气候因子 (降水、温度和辐射等) 对全球 WUE 的影响。王芳^[24]等基于 MODIS 分析了安徽省 WUE 的时空分布变化和与气候因子 (气温和降水) 的关系。众多研究结果表明:在全球气候变化的背景下,各气候因子的变动对不同地区 WUE 产生的影响具有显著差异。

新疆是我国干旱化较严重的区域,水资源有限且时空分布不均,水资源的高效利用与否不仅决定着资源利用的可持续性,而且也决定着区域经济发展的方向 and 产业机构的调整。20 世纪 80 年代以来,新疆气候不断向暖湿化方向发展^[25],气候变暖和降水增多

带来的生态效益亦是显著的,退化生态系统得到恢复,生物量不断增多,植被水分利用效率提高^[11,26-28]。然而,这些 WUE 的变化多是从区域或生态系统或植株个体的角度阐述的,对不同用地类型其上的 WUE 变化研究涉及较少,我们无法得知伴随气候变化与人类活动的共同作用,这些用地类型其上的植被水分利用效率究竟发生怎样的变化,且这些变化与气候变暖本身有多少关系。鉴于此,本文以 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 的 GPP 和 ET 遥感产品数据为基础,结合区域土地利用类型数据,研究分析新疆地区近 14 a (2001—2014 年) 不同土地利用类型 WUE 的时空分布变化及其与气候变化的关系,以期为该区土地生产潜能评价、生态环境保护、国土资源开发建设、水资源的科学配置及管理提供决策依据。

1 研究区概况

新疆位于我国西北,亚欧大陆腹心,分布范围 $73^{\circ}20'—56^{\circ}25'E$, $34^{\circ}15'—49^{\circ}10'W$,属温带大陆性气候 (图 1)。区内分布有东西向伸展的三大山系:阿尔泰山、天山和昆仑山,其间分布有准噶尔盆地和塔里木盆地,形成了“三山夹两盆”的独特山—盆相间地貌格局。以天山山脉为界,南北疆气候与景观差异较大:北疆气候温和,降水相对丰富,植被较多,分布有半固定型沙漠,以荒漠为主;南疆气候炎热,降水稀少,植被稀疏,流动型沙漠广布。从土地利用整体上看,全区以未利用地、草地和耕地为主。

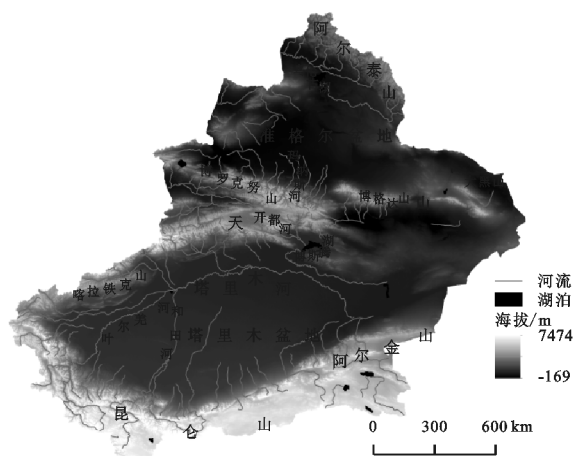


图 1 研究区位置及地理环境示意图

2 数据来源、处理与方法

2.1 GPP 和 ET 数据

总初级生产力 (GPP) 和蒸散发 (ET) 数据分别来源于 2001—2014 年 MODIS 数据产品中的 MODIS17A2 和 MODIS16A3 的月合成数据,空间分辨

率为 1 km, 轨道号为“h23v04”、“h23v05”、“h24v04”、“h24v05”、“h25v04”、“h25v05”。该产品由美国蒙大拿大数字地球动态模拟研究发布(<http://www.ntsug.umd.edu/project/>)。

首先利用 MRT(MODIS Reprojection TOOLS)对影像数据进行拼接、重投影和提取;然后利用 ArcGIS 中的裁剪工具将研究区裁剪出来。与此同时,在 ArcGIS 中完成 2001—2014 年每年的土地利用数据的裁剪工作。最后,对 GPP 和 ET 数据的无效值进行剔除。处理后的 GPP 和 ET 数据按照以下公式计算 WUE 值:

$$WUE = \frac{GPP}{ET} \quad (1)$$

式中:WUE 为某一栅格水分利用效率 [$\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$];GPP 为某一栅格的总初级生产力 (gC/m^2);ET 为某一栅格对应的蒸散发值 (mm)。

2.2 土地利用类型数据

包括两类:(1) MODIS 土地利用类型数据,空间分辨率 500 m,时间分辨率 1 a,时段 2001—2014 年,由美国蒙大拿大数字地球动态模拟研究发布(<http://www.ntsug.umd.edu/project/>),主要用于 WUE 时间序列分析;(2) Landsat 土地利用类型数据,空间分辨率 1 km,时间分辨率 5 a,时段为 2000 年、2005 年、2010 年和 2015 年,来源于寒区旱区科学数据中心(<http://westdc.westgis.ac.cn/>),主要用于 WUE 空间分析。

土地利用类型按照一级分类标准划分为:耕地、林地、草地、水域、城乡居工地和未利用地。由于水域和城乡居工地植被稀少,可忽略不计。此外,未利用地中的沼泽相较于其他二级土地类型植被较丰富,因此对沼泽进行了单独分析。

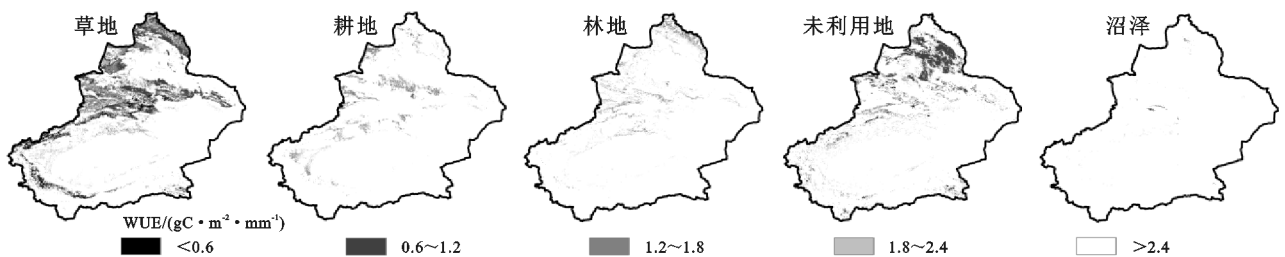


图 2 2001—2014 年新疆地区不同土地利用类型 WUE 的多年年均空间分布

3.2 不同土地利用类型 WUE 的年际变化

新疆各土地利用类型 WUE 总体上呈现波动增加的趋势(图 3)。其中,沼泽 WUE 的年际变化最为显著,每年增加 $0.0218 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$ 。未利用地增长速度最慢,为 $0.0023 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})$,这主要与其自身的植被类型和分布面积有关。在这 14 a 间,沼泽、林地、耕地的波动变化较为剧烈,尤其是

2.3 气象数据

选取新疆地区 50 个气象站点 2001—2014 年的逐日气温、降水量、平均湿度、日照时数、平均风速数据,数据来源于国家气象信息中心(<https://data.cma.cn>)。采用 ANUSPLIN 方法对其进行空间插值,并与 WUE 的年变化进行空间相关分析。

3 结果与分析

3.1 不同土地利用类型多年年均 WUE 空间分布

2001—2014 年新疆地区不同土地利用类型下的年均 WUE 空间分布具有明显差异(图 2)。其中,草地 WUE 的高值区主要分布于南疆环塔里木盆地周边 (>1.8),最高可达 $5.03 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$,由内而外逐级减小,至山地降低至 0.6 以下;相比较,北疆草地 WUE 要低于南疆,多介于 $0.6 \sim 1.8$,主要分布于天山山脉、伊犁河谷、阿尔泰山脉和塔额盆地;耕地 WUE 的高值主要分布于南疆西部和北部的塔里木河周边地区,其中叶尔羌河周围最高,可达 $2.4 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 以上;其次分布于北疆塔额盆地、博罗科努山和伊犁河谷,WUE 介于 $1.2 \sim 1.8$;林地 WUE 在空间上分布比较零散,主要分布在阿尔泰山脉、博罗科努山、伊犁河谷和塔里木盆地外缘,WUE 变化范围在 $0.02 \sim 5.03 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$,但大部分地区的 WUE 在 $0.6 \sim 1.8 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$;未利用地 WUE 变化幅度最小,其范围为 $0.01 \sim 4.22 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$,主要集中于 $0.6 \sim 1.2$,分布于准格尔盆地;沼泽 WUE 主要集中在分布在乌伦古湖附近和开都孔雀河的上游,变化范围在 $0.11 \sim 4.94 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$,其中开都孔雀河上游地区的 WUE 较大。总体上,相较于其他土地利用类型,耕地年均 WUE 绝大部分在 $1.2 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 以上,而未利用地年均 WUE 基本处于 $0.6 \sim 1.2 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。

在 2009—2010 年沼泽、林地、草地和耕地发生了显著的波动,这主要是因为 2010 年新疆地区平均蒸散发相较于 2009 年具有明显的增加,ET 的增加导致 WUE 的下降。从整体来看,新疆各土地利用类型 WUE 存在差异,耕地的年均 WUE 最高,达到 $1.57 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$;之后依次为沼泽 [$1.54 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$]、林地 [$1.33 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$]、草地 [$1.04 \text{ gC}/$

($\text{m}^2 \cdot \text{mm}$)]和未利用地[$0.74 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$]。其中耕地的 WUE 高于其他土地利用类型的 WUE,这主要与人类合理的灌溉和施肥等措施有关。其次,沼泽 WUE 较高主要是因为沼泽水分比较丰富,为植物的生长提供了有利的条件。林地和草地的 WUE 主要与其自身的光合和耗水功能有关。未利用地大部分地区是以荒漠、植被稀疏地、冰川为主,这些地方植被稀少,GPP 极低。同时,这些地区地表大多裸露,植物蒸腾作用较少,主要以土壤蒸发为主。因此,WUE 整体处于低状态且年际变化稳定,受其他环境条件和人为影响较少。

2001—2014 年新疆各土地利用类型 WUE 的年际变化具有明显的空间差异(图 4)。其中,草地有 79%的区域 WUE 处于增加趋势,其中东部大黑山附近增加趋势较其他地方显著;有 21%的区域 WUE 处于下降趋势,主要集中分布在喀什河、开都河和哈拉铁克山周围,其他地方零散分布。耕地绝大部分地区 WUE 的年际变化在 $0.03 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 以下,其中 38.3%的区域出现负增长趋势,以博乐市、玛纳斯河、叶尔羌河和和田河交汇处等区域较为明显。林地

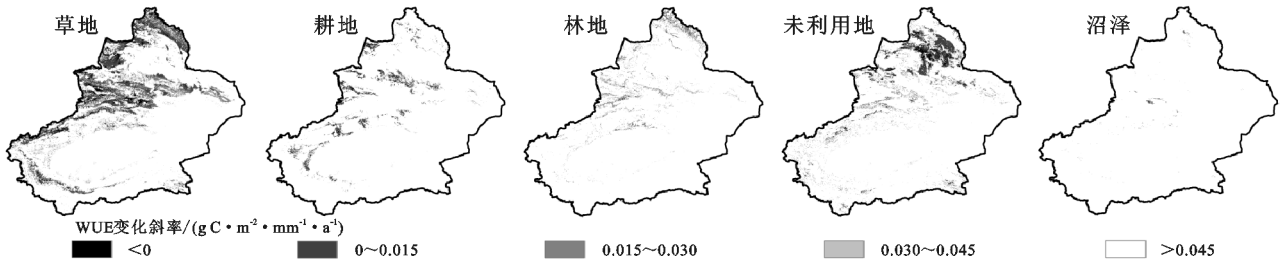


图 4 2001—2014 年新疆各土地利用类型 WUE 变化斜率

3.3 不同土地利用类型 WUE 的年内变化

图 5 为新疆地区 2001—2014 年不同土地利用类型 WUE 的月变化箱线图。从整体来看,各用地类型 WUE 的年内分布并不一致,但最小值均出现在 12—2 月份,接近于 0,是由于该阶段土壤中的水分处于固态,较难被植被吸收和利用。从分布型来看,草地和未利用地的 WUE 基本表现为相同分布型,即整体上表现为先增加后减小的“单峰型”趋势,6—8 月份 WUE 较高,7 月份达到峰值。对于草地而言这主要是因为该时间段的水热条件适宜,植被生长旺盛,其 GPP 相对较高,从而产生较高的 WUE。而在未利用地中,ET 在 WUE 的变化中起到了主导作用,由于 6—8 月份新疆气温较高,使得土壤中的水分在短时间内蒸发较大,月均 ET 就会减少,从而引起 WUE 的增加。

林地 WUE 呈现出 3—6 月急剧增加,6—9 月基本保持稳定,9 月之后又急剧下降的“增加—稳定—

WUE 的变化趋势主要以上升为主,60%的区域以每年 $0.015 \sim 0.03 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 的速度增长,主要分布于阿尔泰山脉附近。未利用地有 90%的区域其 WUE 变化趋势在 $0.015 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 以下,其中主要分布在准格尔盆地附近。正负增长趋势由北到南呈交错分布。沼泽 81%的区域 WUE 年际变化趋势在 $0 \sim 0.03 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$,主要分布于乌伦古湖附近和开都—孔雀河的上游。

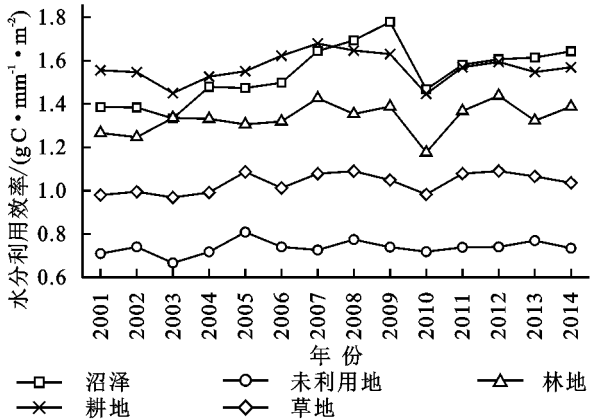


图 3 2001—2014 年新疆地区各土地利用类型 WUE 的时间动态变化

增加”的趋势。期间,4 月和 5 月的 WUE 变化最大,稳定性差,这主要是因为 4 月、5 月份林地处于较快生长阶段,光合和呼吸作用变化较大从而导致其 GPP 在不同时期具有较大差异^[29]。而耕地和沼泽的 WUE 年内分布具有大体相似的分布类型,即“双峰型”,但仍有明显差异。沼泽 WUE 较小值出现在 7 月。究其原因,沼泽地区具有丰富的水源,随着气温的逐渐升高,GPP 的增长趋势变缓,ET 则不断增加,当 ET 的增长速度超过 GPP 时,WUE 就会下降。而耕地的 WUE 年内变化主要表现为 3—5 月急速增长,5 月达最大,之后又快速下降,9 月略有回升,之后又急剧下降。这主要与耕地的人文社会属性有关,3—5 月是农作物快速生长阶段,此时 GPP 的增长要远大于 ET 的增加,因此 WUE 处于增长阶段。但在 5 月之后,随着温度的不断升高,ET 的增长开始大于 GPP 的增长,从而出现 WUE 下降的趋势,而后的 9 月气温下降,ET 随之减小,WUE 略有回升,此后由于农作物收割,GPP 急速降低,WUE 再次下降。

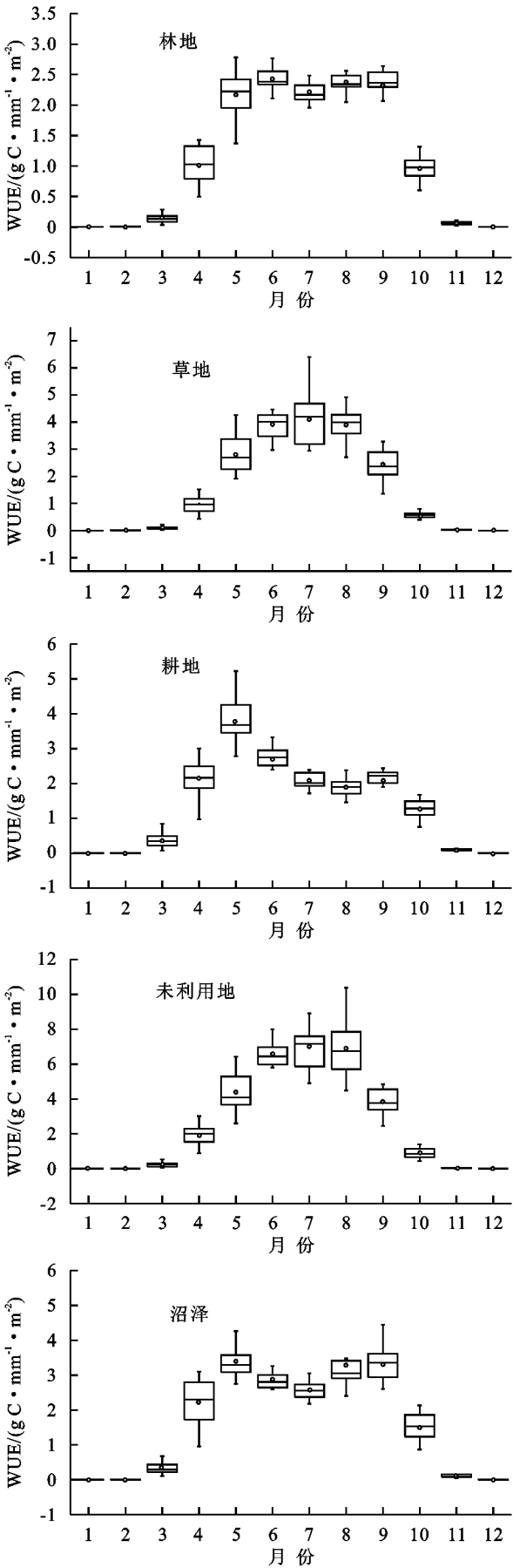


图5 2001—2014年新疆不同土地利用类型 WUE 的年内动态变化

3.4 不同土地利用类型 WUE 的年际变化对气候因子的响应

为定量分析植被水分利用效率年际变化对气候因子变化的响应,本文逐像元计算了相邻年份 WUE 变化量与年均气温、年降水量、年均湿度、年日照时数、年均风速等气候因子的相邻年份变化量之间的相关系数,对各土地利用类型 WUE 与气候变化呈显著相关性($p < 0.05$)的面积占比做了统计(表 1),并选择与气候因子显著相关面积占比较大的做空间格局分析。新疆各土地利用类型 WUE 年际变化对各气候因子的响应具有明显的空间差异。从显著性来看,各土地利用类型 WUE 与降水、平均风速和平均湿度呈显著负相关性的区域要明显大于显著正相关性的区域,而与日照时数呈显著正相关性的区域要明显大于显著负相关性的区域。除未利用地之外,其他土地利用类型 WUE 与气温呈显著正相关性的区域要明显大于显著负相关性的区域。

表 1 WUE 变化与各气候因子显著相关性面积占比

		%				
土地利用类型		气温	降水	平均风速	日照时数	平均湿度
草地	显著正相关	3.46	3.76	0.24	8.63	2.88
	显著负相关	0.84	10.24	5.61	0.79	12.22
耕地	显著正相关	9.52	1.28	0.15	10.12	0.7
	显著负相关	0.2	20.8	3.01	0.11	18.78
林地	显著正相关	4.01	0.54	0.08	15.86	0.65
	显著负相关	0.45	19.54	2.86	0.18	29.7
未利用地	显著正相关	3.82	3.90	0.32	7.68	0.7
	显著负相关	3.69	5.55	6.26	0.73	7.07
沼泽	显著正相关	7.69	0.31	0.19	14.26	2.88
	显著负相关	0.19	32.20	2.18	0.08	45.29

从土地利用类型上看,除未利用地外,其他土地利用类型 WUE 与降水和平均湿度呈显著相关性较强。其中,沼泽 WUE 变化与降水和平均湿度呈显著负相关面积占比最大,分别为 32.2%和 45.29%,都集中分布在乌伦古湖附近和开都—孔雀河的上游。草地和林地 WUE 变化与降水呈显著负相关面积占比分别为 10.24%和 19.54%,都在阿尔泰山脉附近较集中,与平均湿度呈显著负相关面积占比分别为 10.24%和 19.54%,主要分布在阿尔泰山脉和塔里木河中段附近。而对于耕地而言,WUE 与降水和平均湿度呈显著负相关的区域集中分布在额尔齐斯河、玛纳斯河、喀什噶尔河和开一孔河附近。

由表 2 可知,草地 WUE 年变化量与降水和平均

湿度年变化量的决定系数最大,即在各气候因子中,降水和平均湿度起主导作用;对耕地而言,WUE 与降水的决定系数最大为 0.18,即降水对耕地 WUE 的影响最大;对林地、和沼泽而言,WUE 与平均湿度的决定系数最大,分别为 0.17,0.22,0.31,即平均湿度占主导。而在未利用地中各气候因子对 WUE 的影响较平均。

表 2 新疆不同土地利用类型的 WUE 变化与
各气候因子变化的决定系数

土地利用 类型	气温	降水	平均 风速	日照 时数	平均 湿度
草地	0.07	0.14	0.09	0.11	0.14
耕地	0.10	0.18	0.06	0.12	0.17
林地	0.06	0.17	0.06	0.15	0.22
未利用地	0.11	0.11	0.10	0.12	0.11
沼泽	0.08	0.23	0.05	0.14	0.31

4 结论

(1) 从土地利用类型上来看,不同土地利用类型 WUE 具有较强的空间分异性。对于草地,北疆西部年均 WUE 较高,南疆则是从塔里木盆地向外逐渐降低;耕地年均 WUE 较大值主要分布在新疆的西北部;林地 WUE 分布比较零散,环塔里木盆地的 WUE 相对较高;未利用地大部分区域年均 WUE 处于 0.6~1.2 gC/(m²·mm),集中分布在柴达木盆地;对于沼泽,乌伦古湖附近年均 WUE 较其他地区更高。

(2) 2001—2014 年新疆不同土地利用类型 WUE 整体上呈现增加的趋势。其中沼泽增加最快,之后依次为林地、草地、耕地、未利用地。从整体来看,耕地的年均 WUE 最高,未利用地最低。从空间动态变化来看,各土地利用类型 WUE 处于增加的趋势的区域占比重较大,草地、耕地和未利用地存在明显的负增长主要集中分布在准格尔盆地、博罗科努山、伊宁市和塔里木盆地外围,其他地方零散分布。

(3) 从整体来看,各用地类型 WUE 的年内分布并不一致但最小值出现在 12 月、1 月份。草地和未利用地的年内 WUE 都表现为先增加后减小的“单峰型”趋势,峰值出现在 7 月份。林地 WUE 呈现出在 3—6 月急剧增加,6—9 月基本保持稳定,9 月之后又急剧下降的“增加—稳定—增加”的趋势。沼泽地整体呈现出“双峰型”结构,波谷值出现在 7 月。耕地 WUE 在 5 月达到峰值后开始下降,在下降过程中,9 月份有略微波动上升的趋势。

(4) 从显著性来看,各土地利用类型 WUE 与降

水、平均风速和平均湿度呈显著负相关性的区域要大于显著正相关性的区域,而日照时数则相反。除未利用地之外,其他土地利用类型 WUE 与气温呈显著正相关性的区域要大于显著负相关性的区域。从土地利用类型上看,除未利用地外,其他土地利用类型 WUE 与降水和平均湿度呈显著相关性面积占比要明显大于其他气候因子。

新疆位于我国的西北内陆地区,具有特殊的陆地植被,其水资源的科学配置和合理应用对新疆的可持续发展具有重要意义。本文把气温、降水量、平均湿度、日照时数、平均风速作为影响因子对不同土地利用类型 WUE 的影响进行了分析,但影响 WUE 的因素除气候因素外,还受到人文因素的影响。因此,在未来的研究中,我们应量化人类活动对不同土地利用类型 WUE 的影响。

参考文献:

[1] Nemani R R, Keeling C D, Hashimoto H, et al. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999[J]. Science, 2003,300(5625): 1560-1563.

[2] Sakamoto T, Gitelson A A, Wardlow B D, et al. Estimating daily gross primary production of maize based only on MODIS WDRVI and shortwave radiation data [J]. Remote Sensing of Environment, 2011,115(12): 3091-3101.

[3] McCaughey J H, Pejam M R, Arain M A, et al. Carbon dioxide and energy fluxes from a boreal mixedwood forest ecosystem in Ontario, Canada[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2006,140(1/4):79-96.

[4] 邹杰,丁建丽.2000—2014 年中亚地区主要植被类型水分利用效率特征[J].林业科学,2019,55(3):178-185.

[5] 徐晓桃.黄河源区 NPP 及植被水分利用效率时空特征分析[D].兰州:兰州大学,2008..

[6] 张春敏.长江源区植被净初生产力及水分利用效率的估算研究[D].兰州:兰州大学,2008.

[7] 胡中民,于贵瑞,王秋凤,等.生态系统水分利用效率研究进展[J].生态学报,2009,29(3):1498-1507.

[8] 夏磊.全球陆地生态系统水分利用效率及人为用地植被缺失热效应估算[D].西安:中国科学院研究生院:教育部水土保持与生态环境研究中心,2005.

[9] 位贺杰.渭河流域水分生产效率遥感模型构建与估算研究[D].西安:陕西师范大学,2015.

[10] 杜晓铮,赵祥,王昊宇,等.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展[J].生态学报,2018,38(23):33-42.

[11] 王庆伟,于大炮,代力民,等.全球气候变化下植物水分

利用效率研究进展[J].应用生态学报,2010,21(12):3255-3265.

[12] 王会肖,刘昌明.作物水分利用效率内涵及研究进展[J].水科学进展,2000,11(1):99-104.

[13] 熊伟,王彦辉,于澎涛.树木水分利用效率研究综述[J].生态学杂志,2005,24(4):417-421.

[14] 胡化广,张振铭,吴生才,等.植物水分利用效率及其机理研究进展[J].节水灌溉,2013(3):11-15.

[15] 曹生奎,冯起,司建华,等.植物水分利用效率研究方法综述[J].中国沙漠,2009,29(5):853-858.

[16] 王云霓,何聪,熊伟,等.宁夏六盘山 3 种典型植物群落水分利用特征及其组分的变化[J].水土保持研究,2015,22(4):34-40.

[17] 邹杰,丁建丽,杨胜天.近 15 年中亚及新疆生态系统水分利用效率时空变化分析[J].地理研究,2017,36(9):1742-1754.

[18] 李肖娟,张福平,王虎威,等.黑河流域植被水分利用效率时空变化特征及其与气候因子的关系[J].中国沙漠,2017,37(4):733-741.

[19] 张远东,庞瑞,顾峰雪,等.西南高山地区水分利用效率时空动态及其对气候变化的响应[J].生态学报,2016,36(6):1515-1525.

[20] 张良侠,胡中民,樊江文,等.区域尺度生态系统水分利用效率的时空变异特征研究进展[J].地球科学进展,2014,29(6):691-699.

[21] 位贺杰,张艳芳,董孝斌,等.渭河流域植被 WUE 遥感估算及其时空特征[J].自然资源学报,2016,31(8):1275-1288.

[22] Liu D, Yu C, Zhao F. Response of the water use efficiency of natural vegetation to drought in Northeast China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018,28(5):611-628.

[23] Xue B L, Guo Q, Otto A, et al. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013[J]. Ecosphere, 2015,6(10):1-18.

[24] 王芳,张运,黄静,等.基于 MODIS 数据的安徽省植被水分利用效率时空变化及影响因素[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1314-1323.

[25] 施雅风,沈永平,胡汝骥.西北气候由暖干向暖湿转型的信号:影响和前景初步探讨[J].冰川冻土,2012,24(3):219-226.

[26] 姚玉璧,杨金虎,肖国举,等.气候变暖对西北雨养农业及农业生态影响研究进展[J].生态学杂志,2018,37(7):2170-2179.

[27] 张家宝,陈洪武,毛炜峰,等.新疆气候变化与生态环境的初步评估[J].沙漠與绿洲气象,2008,2(4):1-11.

[28] 苏宏新.全球气候变化条件下新疆天山云杉林生长的分析与模拟[D].北京:中国科学院植物研究所,2005.

[29] 徐博轩,陈报章,许光,等.基于叶面积指数估算植被总初级生产力[J].生态学报,2016,36(12):3546-3555.



(上接第 236 页)

[13] 肖建勇,周德全,白晓永,等.四川省植被覆盖时空演变及未来变化趋势分析[J].人民长江,2018,49(5):16-21.

[14] 张月丛,赵志强,李双成,等.基于 SPOTNDVI 的华北北部地表植被覆盖变化趋势[J].地理研究,2008,27(4):745-755.

[15] 孟丹,李小娟,宫辉力,等.京津冀地区 NDVI 变化及气候因子驱动分析[J].地球信息科学学报,2015,17(8):1001-1007.

[16] Nosek V, Netrdová P. What values of Moran's I and Theil index decomposition really mean under different conditions: on the issue of interpretation[J]. Letters in Spatial and Resource Sciences, 2017,10(2):149-159.

[17] Moons E, Brijs T, Wets G. Improving moran's index to identify hot spots in traffic safety[J]. Studied in Computational Intelligence, 2009,176:117-132.

[18] 邵霜霜,师庆东.基于 FVC 的新疆植被覆盖度时空变化[J].林业科学,2015,51(10):35-42.

[19] 王钊,杨山,王玉娟,等.基于最小阻力模型的城市空间扩展冷热点格局分析:以苏锡常地区为例[J].经济地理,2016,36(3):57-64.

[20] 谢永琴,魏晓晨.北京物流企业空间布局演化及影响因素分析[J].陕西师范大学学报:自然科学版,2019,47(2):106-115.

[21] 胡峻嵒,黄访,铁烈华,等.四川省森林植被固碳经济价值动态[J].生态学报,2019,39(1):158-163.

[22] 夏红霞.山地森林/干旱河谷交错带植被退化特征[D].成都:四川农业大学,2009.