

# 陕西省植被水分利用效率及与气候因素的关系

仇宽彪<sup>1</sup>, 成军锋<sup>2</sup>

(1. 北京林业大学 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. 陕西千渭之会国家湿地公园管理处, 陕西 宝鸡 721000)

**摘要:**水分利用效率是反映生态系统碳水循环的重要变量。利用 MODIS 的总初级生产力以及蒸散发数据产品, 结合气象数据, 对 2002—2012 年陕西省水分利用效率进行研究。结果发现, 陕西省中部平原区年均 WUE 较高, 北部年均 WUE 较低; 在各植被类型中, 耕地的年均 WUE 最高, 达  $1.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ , 而灌草地年均 WUE 则较低。在不同年降水量及年均温区域, WUE 与气候因子的关系有所差别: 在年降水量低于 627 mm 的地区, WUE 随着降水量增加而增加; 在年均温低于  $11^\circ\text{C}$  的地区, WUE 随着年均温的增加而增加。2002—2012 年陕西省各植被类型 WUE 呈增加趋势, 其中林地 WUE 增加趋势不显著。不同的植被类型, 其 WUE 与气候因子关系也不同, 其中降水量对 WUE 产生显著影响的地区主要集中在耕地和草地, 而温度对 WUE 产生显著影响的地区主要集中在林地。

**关键词:**生态; 水分利用效率; 植被类型; 陕西

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2015)06-0256-05

## Vegetation Water Use Efficiency and Its Relationship with Climate in Shaanxi Province

QIU Kuanbiao<sup>1</sup>, CHENG Junfeng<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Shaanxi Qianweizhahui National Wetland Park Management Office, Baoji, Shaanxi 721000, China)

**Abstract:** Water use efficiency (WUE) is one of the most important variables linking the carbon with hydrological cycle. In this paper we used the MODIS data products including the MODIS-GPP (MOD17A3), MODIS-ET (MOD16A3) and the land cover (MOD12) to analyze the tempo-spatial characteristics of WUE in Shaanxi Province. Results showed that the annual average WUE was the highest in the middle plain, while the lowest in the northern plateau. WUE in crop land was the highest among various vegetation types ( $1.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ ), while WUE in shrub and grassland was the lowest. The relationship between WUE and climate depended on the regions. The positive relationship between WUE and precipitation was found in the regions with precipitation less than 627 mm, the similar relationship of WUE with temperature was found in the regions with annual average temperature less than  $11^\circ\text{C}$ . During the period from 2002 to 2012, WUE showed an increasing trend, regardless of insignificant increasing for forest ( $p > 0.05$ ). The regions with significant relationship between WUE and precipitation were mainly dominated by cropland and grassland, while the areas with insignificant relationship between WUE and temperature were dominated by forest.

**Keywords:** ecology; water use efficiency; vegetation type, Shaanxi

水分利用效率(water use efficiency, WUE)是指生态系统耗费单位质量水分所能固定的  $\text{CO}_2$  量。WUE 可反映生态系统植被利用水分将营养物质转化为生物量的能力, 也可揭示区域生态系统碳水循环规律。在全球变化背景下, 通过研究区域生态系统 WUE 的空间分布及其与气候因素之间的关系, 可识

别出区域生态系统中对气候变化较为敏感的地区, 对研究区域生态系统碳水循环、维护区域生态安全均具有重要意义。

目前, 针对 WUE 的计算方法却不一致。在生态系统尺度, 大多采用单位质量水分所固定的干物质, 或者固定的  $\text{CO}_2$  量作为度量<sup>[1-3]</sup>。而在区域尺度上,

则多采用降水利用效率作为度量指标<sup>[4-5]</sup>。但由于渗漏水及径流水并不能被植被所利用,因此降水利用效率并不能准确度量 WUE。作为长期对地观测的主要数据源,MODIS 已有包括植被总初级生产力(gross primary productivity, GPP)以及蒸散发(evapotranspiration, ET)等在内的多种数据产品,并在区域及全球生态系统的相关研究中得到普遍应用<sup>[6]</sup>。

区域生态系统 WUE 受到植被类型、降水量与温度等因素的显著影响<sup>[5,7-10]</sup>。降水量增加、温度升高均能提高生态系统 GPP,并促进蒸散发,因此对于气候变化对区域 WUE 的影响仍然不甚明了。而且,对于不同植被类型 WUE 的变化与气候因素之间的关系仍缺少研究。

陕西省是我国水土流失、土地沙化较为严重的地区之一。陕西省各植被生态系统 WUE 分布及时空变化特征对区域内水土保持等具有重要意义。本文利用 MODIS 数据产品,结合气象数据,对陕西省 WUE 的时空分布格局进行分析,并探讨气候因子对各植被类型 WUE 的影响,进而识别出陕西省 WUE 对气候变化敏感的地区,以期为未来陕西省生态建设提供科学依据。

## 1 材料及方法

### 1.1 研究地概况

陕西省(31°42′—39°35′N, 105°29′—111°15′E)位于我国西北地区东南部,南北狭长,横跨黄河和长江两大水系。省内气候类型多样,自南向北依次分布北亚热带、暖温带及温带。全省年平均气温在 7~16℃,年降水量 517 mm<sup>[11]</sup>,年均温及降水量均呈由南至北递减趋势。省内地形地貌多样,南部为秦巴山区,中部为关中平原,北部为黄土高原,自然环境复杂。植物资源丰富,从南至北分布有北亚热带常绿阔叶林、暖温带落叶阔叶林、森林草原以及温带草原等植被类型。但北部黄土高原则是我国水土流失的重点地区,陕西省水土流失面积占全省国土面积的 66.9%,水土流失问题严重<sup>[12]</sup>。近年来,针对陕西省水土流失以及土地沙化等问题,包括生态环境建设综合治理工程、天然林资源保护工程、退耕还林工程、重点防护林工程、水土保持工程和天然草场恢复与建设工程等在内的一系列生态建设工程相继开展。

### 1.2 研究方法

1.2.1 数据来源 本文利用 2002—2012 年 MODIS 的数据产品 MOD17A3 作为陕西省陆地植被总初级生产力的数据来源。MODIS 是 Terra 和 Aqua 卫星上搭载的主要传感器之一。1999 年 Terra 卫星发射成功。

2000 年之后 NASA 开始对外共享 MODIS 数据,但直到 2002 年 MODIS 的数据产品才较为可信<sup>[13]</sup>。

本文利用 2002—2012 年 MOD17A3 与 MOD16A3 数据产品,分别作为生态系统 GPP 及 ET 数据。MOD17A3 和 MOD16A3 为年 GPP 与年 ET 数据,空间分辨率为 1 km。土地利用类型数据利用 MOD12 数据产品,采用 IGBP 土地利用分类体系。以上数据均来自于蒙大拿大学 NTSG 处理的 5 级 MODIS 数据产品(<http://www.nts.gov.umt.edu/project/mod17>)。

本文所使用的气象数据包括 2002—2012 年陕西省 23 个气象站点年降水量及年均温数据。该数据来源于国家气候数据中心提供的全国 752 个气象站点的年均温、降水量数据(<http://cdc.cma.gov.cn/>)。

1.2.2 数据处理方法 本文的水分利用效率采用植被总初级生产力与蒸散之比进行表示(见公式 1)。

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

式中:WUE——水分利用效率 [ $g/(m^2 \cdot mm)$ ]; GPP——陆地生态系统总初级生产力 ( $g/m^2$ ); ET——生态系统蒸散发(mm)。

由于 MOD17A3, MOD16A3 以及 MOD12 数据产品均采用正弦投影,且分幅进行保存,因此在进行数据分析之前需对这些数据进行重投影及拼接。该项工作在 MODIS Reprojection Tool 中完成。对于重投影及拼接的数据进行掩膜运算,裁剪出陕西省的 GPP, ET 及土地利用图件,该项工作在 ArcGIS 10.1 平台中完成。

对于气象数据,本文利用 ArcGIS 10.1 中的地统计模块,对位于陕西省及其邻近地区的各气象站点的年均温及降水量进行普通克里金插值,生成连续的年降水量与年均温栅格数据,年均温及降水量栅格数据空间分辨率均为 1 km。

为研究陕西省 WUE 的分布格局及影响因素,本文针对 2002—2012 年年均 WUE 进行分析。针对气候因素对年均 WUE 空间分布的影响,本文采用 2002—2012 年年均 WUE 与年均降水量、年均温进行分段回归分析。为研究不同植被类型 WUE 的差异,本文利用方差分析方法进行分析。

为反映 2002—2012 年 WUE 的变化趋势及空间差异,本文在像元尺度对 WUE 与年份进行简单线性回归。简单线性回归的斜率作为 10 a 间该像元 WUE 的变化趋势。为分析陕西省 WUE 的时空变异与气候要素之间的关系,在像元尺度对 WUE 与年均温、年降水量进行一元线性回归。一元线性回归斜率的计算公式见式(2):

$$\text{slp} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

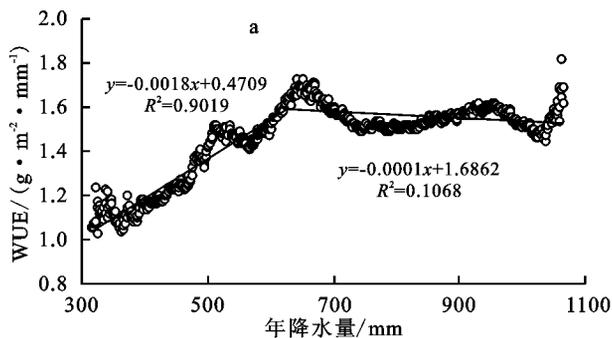
式中:slp——斜率 $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{a})]$ ;  $y$ ——WUE $[\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})]$ ;  $i$ ——年份;  $n$ ——时间跨度, 本文  $n=11$ ;  $x$ ——年份, 或者表示各年年均温或年降水量。如果 slp 为正值, 则表示 2002—2012 年该像元 WUE 呈增加趋势, 或者 WUE 与年均温或年降水量呈正相关, 反之则呈减少趋势, 或 WUE 与年均温或年降水量呈负相关。选择  $p=0.05$  作为显著度水平。

## 2 结果与分析

### 2.1 WUE 的空间分布

2002—2012 年陕西省 WUE 呈现中、南部较高而北部较低分布, 即中部农业区及南部秦巴山区高于北部黄土高原区和土地沙化区(见附图 11)。渭南大部、西安中部及东北部、咸阳南部以及宝鸡中部 WUE 较高, 平均达  $1.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ ; 商洛、安康、汉中以及延安年均 WUE 在  $1.4 \sim 1.5 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ , 部分地区年均 WUE 可达  $1.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ , 但这些地区分布较为零碎; 榆林年均 WUE 在  $1.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$  以下, 其中在榆林北部长城沿线, 年均 WUE 在  $1.0 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$  以下。

通过统计 2002—2012 年各植被类型分布范围内诸像元 WUE 的平均值和标准差, 可以发现 2002—2012 年陕西省各类植被类型其 WUE 存在差异(见图 1)。耕地的年均 WUE 最高, 达  $1.59 \pm 0.21 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ ; 其次依



注: 年降水量和年均温分别采用组距为  $1 \text{ mm}$  和  $0.1^\circ\text{C}$  进行分组, 纵坐标为各组 WUE 均值。

图 2 2002—2012 年陕西省与年降水量和年均温的关系

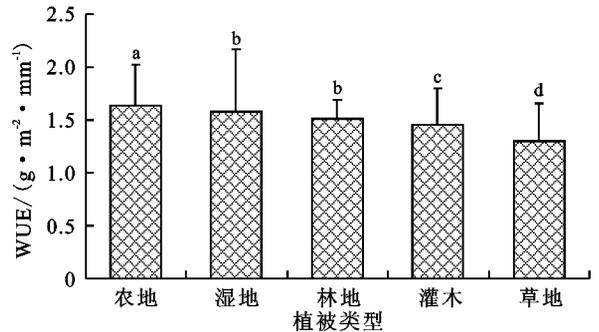
### 2.3 WUE 年际波动

2002—2012 年陕西省有 93% 的区域其 WUE 呈上升趋势, WUE 上升主要集中在陕西省中北部偏东地区, 包括榆林中南部、延安北部及中部以及渭南大部(附图 12)。其中, 在榆林中南部、延安大部、铜川、咸阳东北部、渭南大部以及西安东南部 WUE 显著升高 ( $p < 0.05$ )。WUE 降低的地区主要分布在陕西省南部秦巴山区, 主要包括安康东南部及汉中西南部, 此

次为林地 $[1.51 \pm 0.29 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})]$ 、湿地 $[1.51 \pm 0.15 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})]$ 、灌木 $[1.42 \pm 0.28 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})]$ 和草地 $[1.27 \pm 0.24 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})]$ 。

### 2.2 WUE 与气候因素的关系

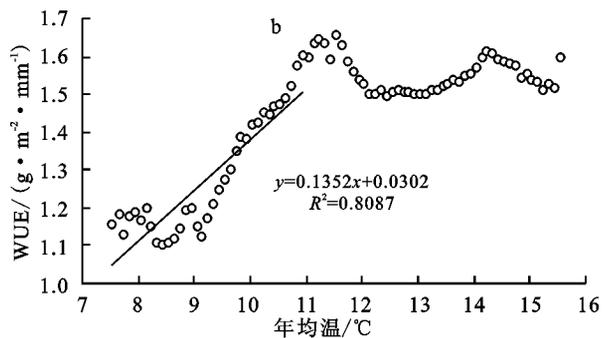
2002—2012 年年均 WUE 与年降水量 (PRCP) 与年均温 ( $T_a$ ) 的关系并非非线性(见图 2)。在年均降水量小于  $627 \text{ mm}$  的地区, 年均 WUE 与年均降水量呈显著正相关 ( $R^2 = 0.90, p < 0.01$ ), 年均降水量每增加  $100 \text{ mm}$ , 则年均 WUE 增加  $0.18 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。在年均降水量大于  $627 \text{ mm}$  的地区, 年均 WUE 与年均降水量之间呈负相关关系 ( $R^2 = 0.10, p < 0.01$ ), 年均降水量每增加  $100 \text{ mm}$ , 则年均 WUE 下降约  $0.01 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。



注: 图中误差线上方字母表示差异显著 ( $p < 0.05$ )。

图 1 2002—2012 年陕西省各植被类型水分利用效率

在年均温低于  $11^\circ\text{C}$  的地区, 年均 WUE 与年均温呈显著正相关 ( $R^2 = 0.83, p < 0.01$ ), 年均降水量每增加  $1^\circ\text{C}$ , 则年均 WUE 增加  $0.14 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。在年均温高于  $11^\circ\text{C}$  的地区, 年均 WUE 与年均温之间无显著关系 ( $p > 0.05$ )。



外, 宝鸡中部偏西及榆林西南部地区 WUE 也呈减小趋势, 但这种减小趋势并不显著 ( $p > 0.05$ ), 见图 3。

2002—2012 年陕西省各植被类型 WUE 变化趋势存在差别(见表 1)。2002—2012 年, 林地 WUE 无显著变化 ( $p > 0.05$ ), 其他植被类型的 WUE 均呈显著的增加趋势。其中, 农地和草地的增加趋势较为明显, 平均每年增加  $0.02 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$  ( $p < 0.01$ )。

2002—2012 年陕西全省有 74% 的地域, 其

WUE 随着 PRCP 的增加而降低。其中,占全省国土面积 14% 的地域呈显著负相关( $p < 0.05$ ),这些地区主要分布在陕西北部,包括榆林北部长城沿线以及南部、延安北部(见附图 13a)。上述地区 PRCP 每增加 100 mm, WUE 则至少下降  $1 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ 。除上述地区外,在咸阳西部、宝鸡北部以及汉中西部, WUE 与 PRCP 仍呈显著的负相关关系,但每 100 mm 降水量引起的 WUE 下降幅度小于陕北地区,显著降低的地域也较陕北零散。另外 26% 的地域,包括榆林东部、延安东南部、安康大部等,其 WUE 随着 PRCP 的增加而增加,但二者之间关系不显著( $p < 0.05$ )。

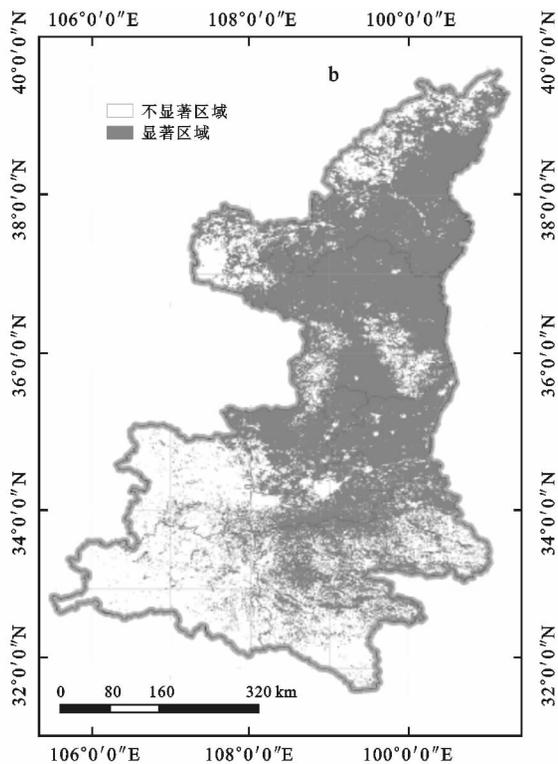


图 3 2002—2012 年陕西省 WUE 变化斜率

表 1 2002—2012 年各植被类型 WUE 变化趋势回归结果

植被类型	变化趋势方程	$R^2$	$p$
农地	$y = 0.02x + 1.44$	0.59	$< 0.01$
林地	$y = 0.01x + 1.42$	0.25	0.07
灌木	$y = 0.01x + 1.33$	0.46	$< 0.05$
草地	$y = 0.02x + 1.12$	0.60	$< 0.01$
湿地	$y = 0.02x + 1.40$	0.50	$< 0.01$

2002—2012 年,陕西全省有 83% 的地域,其 WUE 与  $T_a$  呈负相关,其中占全省国土面积 16% 的地域呈显著负相关( $p < 0.05$ )。这些地域主要包括榆林中部、延安东南部与西南部、咸阳东北部以及关中平原南部地区(见附图 13b)。全省只有 17% 的地域其 WUE 与温度呈正相关,但显著正相关面积只有全省国土面积的 0.7% ( $p < 0.05$ ),零星分布于汉中、

安康及榆林西南部。

PRCP 与  $T_a$  对陕西省 WUE 的影响区域(见附图 13c)。PRCP 对 WUE 产生显著影响的地区主要包括关中原南部、延安东南与西南、咸阳东北以及榆林中北部。 $T_a$  显著影响地区则主要分布在延安中部、宝鸡中北部以及汉中西南部。PRCP 与  $T_a$  均产生显著影响的区域则较小。从在各植被类型的分布来看,在 PRCP 显著影响的区域中,分别有 41% 和 37% 的面积分布在农地和草地;而  $T_a$  显著影响的地区中,有 56% 的面积分布在林地。这也表明水分是影响陕西省农地和草地 WUE 的主要因素,而温度则是影响林地 WUE 的主要因素。

陕西省各植被类型中耕地的 WUE 最高,灌草地的 WUE 则较低。这与青藏高原的研究结果类似<sup>[9]</sup>。尽管针对内蒙古各植被类型 WUE 的研究发现灌丛的降水利用效率为最高,但在河套等便于灌溉的地区其农地降水利用效率则高于周边植被<sup>[4]</sup>。可见,在一定程度上,农地的 WUE 高于其他植被类型,这似与合理的灌溉,以及施肥等措施有关<sup>[14]</sup>。

陕西省各植被类型 WUE 的空间分布与 PRCP,  $T_a$  大体呈正相关关系,但这种关系并非线性。其他地区 WUE 的研究也发现这种非线性关系<sup>[2,4,5,9]</sup>。在降水量不同的地区,降水量对 WUE 的作用存在差异。在降水量较少的地区,降水量增加会促进植物的光合作用,从而导致初级生产力的大幅增加,而蒸散发的增幅较小,因此导致降水量较少地区 WUE 的增加;而对于降水量较多的地区,相同增幅的降水量对初级生产力的促进作用较弱,却极大的增加了可供蒸发的水量,因此导致该地区 WUE 较低<sup>[15]</sup>。可见,区域生态系统 WUE 对气候因素的响应,仍然符合最小限制因子定律。

从各植被类型 WUE 的年际变化来看,农地 WUE 的增加趋势明显,而林地 WUE 却无显著增加。这与 Tian 利用 NPP 与 ET 的比值对美国中部大平原各植被类型 WUE 的研究结果类似<sup>[15]</sup>。各植被类型 WUE 的变化趋势差异与各植被类型分布区气候变化情况相关。从以上分析可知,降水显著影响的地区主要分布在农地和草地范围内,而温度显著影响的地区则位于林地范围内。而 2002—2012 年,陕西省年降水量与年均温的变化趋势(见表 2)却显示,降水量出现显著增加,全省超过 66% 的国土面积降水量有所增加,空间分布上来看,降水量增加的地区主要集中在陕西省南部、西南部及东北部地区;而省内超过 99% 的地区,其年均温呈降低趋势。由此可见,2002—2012 年陕西省年均温下降而年降水量变化则呈现地区差异。在农地集中分布于省中部渭河谷地,草地则主要分布于省东北部地区,因此气候上的变化导致了这两种植

被类型 WUE 的增加趋势较为明显。

表 2 2002—2012 年陕西省 PRCP,  $T_a$  正负变化  
面积比重统计 %

参数	面积比重统计 %	
	>0	<0
PRCP	66.24	33.76
$T_a$	0.39	99.61

>0 和 <0 分别表示 PRCP,  $T_a$  正变化和负变化。

### 3 结论

本文利用 MOD17A3, MOD16A3 以及 MOD12 数据产品, 结合陕西省气象数据, 分析了 2002—2012 年陕西省生态系统 WUE 的空间分布以及变化特征。结果发现:

(1) 陕西省中部渭河河谷地区 WUE 较高, 而北部黄土高原及土地沙化区 WUE 较低, 且南部秦巴山地区 WUE 高于北部地区。从行政区来看, 渭南、西安等市 WUE 较高, 可达  $1.7 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ , 而榆林 WUE 较低, 仅在  $1.3 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$  以下。

(2) 各植被类型间 WUE 不同。各植被类型中, 耕地的年均 WUE 最高, 平均达  $1.59 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{mm})$ , 而灌草地 WUE 则较低。耕地的 WUE 较高, 与灌溉以及施肥有关。

(3) 年均 WUE 的空间分布与年降水量、年均温等气候因素之间的关系并非线性。在年降水量低于  $627 \text{ mm}$  的地区, WUE 随着降水量增加而升高, 而在年降水量高于  $627 \text{ mm}$  的地区, WUE 则随年降水量的增加而下降; 在年均温低于  $11^\circ\text{C}$  的地区, WUE 随着年均温的增加而增加, 而在年均温高于  $11^\circ\text{C}$  的地区, WUE 与年均温之间无显著关系。

(4) 2002—2012 年陕西省有 93% 的区域其 WUE 呈上升趋势, WUE 上升主要集中在陕西省中北部偏东地区, WUE 降低的地区主要分布在陕西省南部秦巴山区。10 a 间, 陕西省各植被类型 WUE 呈增加趋势, 但林地 WUE 的增加趋势不显著。不同的植被类型, 其 WUE 与气候因子关系也不同, 耕地与草地 WUE 受到降水量变化的显著影响, 而林地 WUE 则主要受到温度变化的显著影响。

本研究采取陕西省各植被类型作为研究对象, 着重分析了各植被类型 WUE 及其与气候因素之间的关系。但除气候因素外, 种植结构等因素<sup>[16]</sup>对 WUE 仍具有较大影响。对此, 本文并未进行深入研究。因此, 在未来的研究中, 应当开展针对不同土地利用模式及变化与 WUE 之间关系的相关研究。

参考文献:

[1] 王海青, 田育红, 黄薇霖, 等. 不同灌溉量对内蒙古人工

草地主要牧草产量和水分利用效率的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(10): 1-9.

- [2] Ruppert J C, Holm A, Miede S, et al. Meta-analysis of ANPP and rain-use efficiency confirms indicative value for degradation and supports non-linear response along precipitation gradients in drylands[J]. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(6): 1035-1050.
- [3] 卢玲, 李新, 黄春林, 等. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(5): 777-784.
- [4] 穆少杰, 周可新, 齐杨, 等. 内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(1): 1-16.
- [5] Zhongmin H, Guirui Y, Jiangwen F, et al. Precipitation-use efficiency along a 4500 km grassland transect[J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2010, 19(6): 842-851.
- [6] 王琳, 景元书, 李琨. 江苏省植被 NPP 时空特征及气候因素的影响[J]. *生态环境学报*, 2011, 19(11): 2529-2533.
- [7] Huxman T E, Smith M D, Fay P A, et al. Convergence across biomes to a common rain-use efficiency[J]. *Nature*, 2004, 429(6992): 651-654.
- [8] 李辉东, 关德新, 袁凤辉, 等. 科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素[J]. *生态学报*, 2015, 35(2): 478-488.
- [9] 叶辉, 王军邦, 黄玫, 等. 青藏高原植被降水利用效率的空间格局及其对降水和气温的响应[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(12): 1237-1247.
- [10] Guo R, Lin Z, Mo X, et al. Responses of crop yield and water use efficiency to climate change in the North China Plain [J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 97(8): 1185-1194.
- [11] 卫旭东, 刘引鸽, 缪启龙. 陕西省降水量变化及其影响分析[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(4): 40-43.
- [12] 张勇. 陕西省水土流失现状, 存在问题与防治对策[J]. *水利发展研究*, 2005, 4(11): 47-49.
- [13] Running S W, Nemani R R, Heinsch F A, et al. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production [J]. *Bioscience*, 2004, 54(6): 547-560.
- [14] Peterson G A, Schlegel A J, Tanaka D L, et al. Precipitation use efficiency as affected by cropping and tillage systems [J]. *Journal of Production Agriculture*, 1996, 9(2): 180-186.
- [15] Tian H, Chen G, Liu M, et al. Model estimates of net primary productivity, evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895—2007 [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7): 1311-1327.
- [16] 王孟雪, 张金萍, 张玉先. 垄向区田技术参数的区定及对坡耕地大豆产量及水分利用效率的影响[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 233-236.