DOI: 10.5846/stxb201711232092

杜晓铮,赵祥,王昊宇,何斌.陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究进展.生态学报,2018,38(23): -Du X Z, Zhao X, Wang H Y, He B.Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: a review. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 (23): - .

陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应研究 进展

杜晓铮^{1,2},赵 祥^{1,2,*},王昊宇^{1,2},何 斌³

1 北京师范大学地理科学学部,遥感科学国家重点实验室,北京 100875 2 北京师范大学地理科学学部遥感科学与工程研究院,北京市陆表遥感数据产品工程技术研究中心,北京 100875 3 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院,北京 100875

摘要:气候变化显著影响陆地生态系统生产力以及水分利用格局,而水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE)是衡量生态系 统碳水耦合关系的重要指标之一。研究陆地生态系统水分利用效率对气候变化的响应,有助于深入理解生态系统的变化规律, 模拟和预测生态系统碳水过程的发展状况,从而为应对全球气候变化提供新的依据。为了更好地掌握生态系统水分利用效率 研究现状以及其对温度、CO,等关键气候因子的响应情况,本文总结了陆地生态系统水分利用效率对气候变化响应的最新研究 进展。首先介绍了相关的定义并归纳了两种不同计算方式的差异和特点;接着重点总结了陆地生态系统水分利用效率对大气 温度、CO2、水分、干旱以及太阳辐射等影响因素的响应;最后文章总结了目前3个相关的研究态势,主要包括:①长时间序列水 分利用效率与气候要素的关系研究;②土地利用/覆被变化对水分利用效率的影响及其对气候的反馈研究;③多尺度水分利用 效率综合研究。本研究可为深入研究生态系统过程对气候变化的响应提供参考。 关键词:水分利用效率;气候因素;陆地生态系统;GPP;NPP;气候变化

Responses of terrestrial ecosystem water use efficiency to climate change: a review

DU Xiaozheng^{1,2}, ZHAO Xiang^{1,2,*}, WANG Haovu^{1,2}, HE Bin³

1 State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Jointly Sponsored by Beijing Normal University and Institute of Remote Sensing and Digital Earth of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100875, China

2 Beijing Engineering Research Center for Global Land Remote Sensing Products, Institute of Remote Sensing Science and Engineering, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

3 College of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Climate change has a considerable impact on the productivity and water use of terrestrial ecosystems. Water use efficiency (WUE) is an important indicator to measure the tradeoff between carbon gain and water loss of terrestrial ecosystems. Studying the responses of terrestrial ecosystem WUE to climate change will help us understand the mechanism of ecosystem changes, simulate and predict the development of the ecosystem water and carbon balance, and provide a new basis for adapting to global climate change. To better understand the status of ecosystem WUE and the responses of WUE to key climate factors, such as temperature and CO₂ concentration, this study reviewed the current status and progress of the responses of terrestrial ecosystem WUE to climate change. Firstly, definitions of WUE were introduced and the differences

收稿日期:2017-11-23; 网络出版日期:2018-00-00

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFB0501404);遥感科学国家重点实验室自由探索项目(16ZY-06)

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhaoxiang@ bnu.edu.cn

as well as characteristics of two WUE calculation methods were summarized. Then, the responses of terrestrial ecosystem WUE to climate factors, such as temperature, CO_2 concentration, humidity, drought stress, and radiance, were elaborated. Finally, the three current research directions of WUE development were forecasted, mainly including: ① the relationships between the long-term WUE and climate factors; ② the impact of land-use and land-cover change on WUE and its feedback on climate; and ③ comprehensive research of multi-scale WUE. This study can provide a reference for studying the responses of terrestrial ecosystems to climate change.

Key Words: water use efficiency; climatic factors; terrestrial ecosystems; GPP; NPP; climate change

全球气候变化是人类迄今面临的一个重大环境问题。随着极端气候事件在全球范围频繁发生,气候变化显著影响着陆地生态系统的生产力状况以及水分利用格局^[1-2]。水分利用效率(Water Use Efficiency, WUE) 是生态系统对气候变化敏感性的重要指标之一^[3],连接了陆地生态系统碳循环和水循环两个关键过程^[4],它 不仅可以反映两者之间的相互关系,还能够解释陆地生态系统对全球变化响应过程。因此研究 WUE 对气候 的响应有利于更好地模拟生态系统碳水循环过程,揭示生态系统对气候变化响应机理^[5-6],为应对全球变化 提供新思路。

依据不同的研究对象,WUE 大致可以分为叶片、个体、群体以及生态系统四个水平^[3,7-10]。叶片水平的 WUE 定义为单位水量通过叶片蒸腾散失时光合作用所形成的有机物量,是植物消耗水分形成干物质的基本 效率^[7],通常用光合速率与蒸腾速率之比或光合速率与气孔导度之比来表示。个体水平 WUE 是指植物在长 期的生长过程中,形成的干物质量与耗水量的比值^[11]。群体水平 WUE 是指植物群体 CO₂通量和植物蒸腾的 水汽通量之比^[7,9]。生态系统 WUE 通常定义为整个生态系统消耗单位质量水分所固定的 CO₂或生产的干物 质^[12]。随着观测技术的突破,越来越多的研究将实测的生态系统总蒸散,即植被蒸腾与地表蒸发之和作为生 态系统的水分损耗^[4-5,12-23]。

WUE 不仅受控于植物自身的遗传物质基础和生理形态指标,还与外界环境条件密切相关,同时又受两者 互作的影响。在环境条件中,温度、降水、太阳辐射等均是影响生态系统 WUE 的关键气候变化因子^[23-26]。在 全球气候变化背景下,极端气候事件频繁出现对我们研究生态系统 WUE 提出了新的要求^[27-30]。深入研究 WUE 对气候的响应可以为评价生态系统在全球碳水循环中的作用提供科学依据,同时可以揭示陆地生态系统对气候变化响应的核心基础,为应对全球变化提供新思路。

当前有很多关于 WUE 的内涵、方法和进展相关文献^[3,7-10,12,16,31],以及如何提高灌溉农业 WUE 的研究综述^[32-34],但仍然缺少 WUE 对气候变化响应的研究总结。为此,本文首先介绍了生态系统 WUE 的两种计算方式并归纳了各自特点;接着重点介绍了生态系统 WUE 对大气温度、CO₂浓度、水分、干旱以及太阳辐射等气候因素的响应,最后提出了目前 WUE 研究亟待解决的科学问题,以期为深入研究 WUE 对气候变化的响应提供参考。

1 生态系统水分利用效率计算

1.1 WUE 定义

生态系统 WUE 是指整个生态系统损耗单位质量水分所生产的干物质量^[12]。其计算主要包括两部分,一 是生态系统损耗的水分,二是生态系统生产的干物质量。损耗的水分包括植被蒸腾散失的水分和地表蒸发的 水分^[4-5,18-21],两部分结合的水分损耗过程作为蒸散发(Evapotranspiration,ET)过程^[14-15]。生态系统干物质的 量,最常用的表达有两种,总初级生产力(Gross Primary Productivity,GPP)和净初级生产力(Net Primary Productivity,NPP)^[12,14-15,35-37],因此存在使用 GPP 或 NPP 两种方式计算 WUE。

1.2 利用 GPP 计算 WUE

利用 GPP 作为生态系统干物质量,生态系统 WUE 可以表示为 GPP 与 ET 的比值。GPP 又称作总第一性

生产力,指在单位时间、单位面积上,绿色植物通过光合作用所固定的光合产物量或有机碳总量^[38],也称为总 生态系统生产力。植被通过光合作用形成的 GPP 可以表征 CO₂转化为有机碳进入碳循环过程的起始水平, 是生态系统碳循环的基础^[39]。GPP 不仅取决于植物碳同化潜力、植物叶表面积、群落结构等自身条件,还取 决于光合有效辐射、温度、可利用水分以及养分状况等环境条件。

近年来,遥感技术为研究大范围的 WUE 提供了便利^[18-19,23,26,37,40-41],MODIS(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer,MODIS)GPP 和 ET 产品是目前研究生态系统 WUE 普遍采用的数据。Lu^[40]、仇宽彪^[37]、李肖娟^[26]、Xue^[41]、Sun^[18]、Tang^[19]等研究人员利用 MODIS GPP 和 ET 数据对全球不同区域的 WUE 进行探索。由于 MODIS GPP 提供 2000 年之后数据,因此,对于 2000 之前 WUE 估算通常采用通量塔观测数据。Yang 等^[42]利用 1982—2011 年全球通量塔实测数据,经自适应机器学习,训练为全球 GPP 和 ET 值进而获得全球 WUE 值。此外,李明旭等^[23]利用美国气候模式诊断和对比计划委员会(PCMDI)数据库 GPP 数据估算了 2006—2100 年秦岭地区 WUE。

1.3 利用 NPP 计算 WUE

利用 NPP 作为生态系统干物质量,生态系统 WUE 可以表示为 NPP 与 ET 的比值。NPP 又被称作净第一 性生产力,指绿色植物在单位面积、单位时间内所固定的有机物总量,可以看作光合作用所产生的有机质总量 GPP 扣除自养呼吸后的剩余部分^[38],也被看作 GPP 在较长时间段的不确定部分^[43]。它主要反映了植物固 定和转化光合产物的效率,是表示植被净固碳能力的重要生态学指标^[44]。

通常有3种方法获取NPP。第一种方法是通过实地测量获取NPP。李红琴等^[45]通过实地获取地上净初级生产量与地下净初级生产量,用两者之和表示总的净初级生产量,依此计算2000—2011年间高寒草甸植被WUE的变化。这种方法适合于研究区域相对较小,实测站点较多,观测的时间序列较短的情况。第二种方法是通过模型模拟得到NPP。周宇^[46]、徐晓桃^[14]、张春敏^[47]、位贺杰^[48]等人基于CASA(Carnegie-Ames-Stanford Approach, CASA)模型^[49]反演不同研究区NPP,进而计算了WUE。张远东^[50]、Liu^[43]、Zhang^[20]、卢玲^[51]等分别利用CEVSA(Carbon Exchange Between Vegetation, Soil, and the Atmosphere, CEVSA)^[52]、BEPS(Boreal Ecosystem Productivity Simulator, BEPS)^[53]、IBIS(Integrated Biosphere Simulator, IBIS)^[54]、碳通量估算模型C-FIX^[55]等模型估算不同地区NPP,进而对当地WUE进行计算。这种方法适合于研究空间范围较大、有一定数量观测站的区域,以便获得模型必要的初始数据及参数。同时,模型模拟的结果需要通过实测数据或文献数据验证结果精度。利用模型模拟的方法不限研究时段,可以对现在、过去甚至未来的WUE进行研究。第三种方法是利用卫星遥感数据,如 MODIS 产品得到 NPP^[35]。这种方法研究的空间范围较大,可以扩展到全球范围,但不足是 2000 年之后才有 MODIS NPP 产品,无法对 2000 年之前 WUE 进行研究。同时,由于空间分辨率较粗,适合用于宏观 WUE 的研究。

1.4 两种计算结果的对比

从生产力定义上看,NPP 是 GPP 减去呼吸所消耗的剩余部分,两者具有一定的时空转换关系^[49,56-57],同时,两者在地理单元的时空变化以及对降水、温度等气象要素的响应均表现一致^[24,58]。从内涵意义上看, NPP 被认为是光合作用所产生的有机质总量扣除自养呼吸后的剩余部分^[38],GPP 计算得到的 WUE 表示消耗单位水分所生产的总干物质量,NPP 计算得到的 WUE 表示除去自身呼吸消耗后,消耗单位水分所固定的 干物质量,两种方式得到的 WUE 均可表示植物消耗水分形成干物质的基本效率,使用时可依据获得数据方 式以及研究内容侧重等实际情况,选择对应的方法进行计算。总的来看,使用 GPP 或 NPP 计算得到的 WUE 具有相近的变化趋势,对气象要素的响应也会表现相似。

2 WUE 对气候因子的响应

生态系统 WUE 不仅受系统内部植被的调控,同时也受外界环境条件的影响。温度、CO₂、水分、干旱、太阳辐射等是影响生态系统 WUE 的关键气候因子^[23-26]。另外,单因子作用、多因子的综合作用对生态系统

WUE 的影响目前仍不甚明了^[37]。本文详细介绍了温度、CO₂、水分、干旱、太阳辐射等五种气候因子对 WUE 的影响。表 1 归纳了 WUE 对不同气候因子的响应特点。

气候因子 Climate factors	WUE 对气候变化的响应 WUE responses to climate change	文献 References
温度 Temperature	存在临界温度。临界值以下两者呈现正相关,超过临界值呈现负相关	[35,59-60]
$\mathrm{CO}_2\mathrm{Carbon}$ dioxide	CO2浓度对 WUE 的影响大多数表现为积极作用	[61-64]
水分 Humidity	①大气湿度增加会促进植物 WUE 升高	[65-67]
	②降水量的适当增加会促进 WUE 升高,但是降水量过高又会导致植被 WUE 降低	[21,48]
	③降水通过调节土壤蒸发进而影响生态系统 WUE。降水期间土壤蒸发较低, WUE 表现较高	[68]
干旱 Drought	①湿润地区 WUE 与干旱指数 PDSI 没有明显的相关性,干旱对非水限制的地区影响十分有限	[42]
	②干旱地区 WUE 和 PDSI 呈现负相关	[69-72]
太阳辐射 Radiance	存在光强临界值。临界值以下 WUE 随着太阳辐射的增加逐渐增加,超过临界值 WUE 呈现下降的趋势	[24,73]

表1 WUE 对不同气候因子的响应

Table 1 WUE responses to different climate factors

2.1 WUE 对温度的响应

WUE 与温度之间的关系研究结果显示温度对 WUE 具有一定的促进或抑制影响^[18,20,41,48,74-75]。马利民 等^[74]利用树木年轮测定稳定碳同位素发现植物 WUE 与温度呈现出正相关关系;Zhang 等^[20]利用 IBIS 模型 估计未来中国 WUE 空间变化,结果表明在南方亚热带地区,WUE 与温度呈现负相关,而在青藏高原地区两者 呈现正相关关系;Sun 等^[18]对全球 WUE 模拟时发现 WUE 对温度的敏感性较高,尤其是在高纬度地区,在这 些地区,早春和晚秋的 WUE 呈现增长趋势,这是由于高纬地区常年气温较低,早春和晚秋的气温回暖延长了 植物的生长期,导致 GPP 的增长高于 ET,使 WUE 呈现增长趋势。长江源区的 WUE 值与温度之间同样存在 显著正相关关系,这是由于长江源区常年低温,气温回暖对植被 WUE 有促进的作用^[15]。与之相反,在相对湿 热的亚马逊平原和东南亚地等地区,温度升高对 ET 的促进作用远高于 GPP^[76],导致 WUE 呈现降低的趋势。

温度对 WUE 影响存在临界值,温度过高或过低对植物 WUE 均有不利。当温度低于临界值时,WUE 随 温度的升高而增大,当温度高于临界值时,WUE 与温度则呈现负相关关系。这可能是由于温度同时作用于植 物的光合作用和蒸腾作用,进而影响植物的 WUE^[35,59-60]。由于影响程度的差别,不同研究区域的生态系统, 其临界温度的范围也有所不同。仇宽彪等^[75]对陕西省 WUE 研究时发现,在温度低于 11℃的地区 WUE 和温 度呈现显著正相关(*R*²=0.83,*P*<0.01),而高于 11℃的地区两者之间没有显著关系(*P*>0.05);Xue 等^[41]发现 全球范围内,温度较低的地区,WUE 随温度有直线增长的趋势,在 18.5℃时到达最大,之后出现下降;位贺杰 等^[48]认为当气温处于 15—25℃区间时,植被 WUE 较高,温度过高或过低都会使得植物 WUE 下降。

关于存在临界值的解释有很多,Zhou 等^[59]认为有关光合作用的酶活性受温度限制,而蒸散作用的增加 不受温度的限制。因此当高于理想温度时,光合作用受到抑制而蒸散作用仍在增加,使得植物 WUE 降低。 另一种观点认为,温度通过影响植物气孔导度来影响蒸散过程^[35,60]。起初,温度升高对光合作用的促进效果 高于蒸散作用,造成植物 WUE 升高,当温度高于临界值时,温度升高对蒸散作用的影响比光合作用大,因此 又导致 WUE 降低。

2.2 WUE 对 CO₂的响应

CO₂对 WUE 影响主要体现在两方面。一方面是 CO₂对光合作用的直接影响,CO₂浓度升高会直接提高植物光合作用的速率进而导致 WUE 提高^[64];另一方面,CO₂浓度升高会致使植物气孔导度降低,气孔缩小,耗散水分减少,致使蒸散速率降低,从而导致 WUE 升高^[61,63,77]。但是这两方面的影响程度比较,目前尚不统一^[3]。

大气 CO₂浓度对 WUE 作用主要表现为促进作用。lto 等^[5]发现 1901—2004 年全球陆地生态系统 WUE 表现为增加的主要原因是 CO₂浓度增加引起了生产力的增加; Keenan 等^[78]研究表明,北半球温带的森林 WUE 显着增加的主要原因也是大气 CO₂浓度的增加; Li 和 John 等^[79]在美国切斯皮克湾的试验结果表明当大 气中 CO₂浓度上升至 765µmol/mol 时,生态系统 WUE 大约增长了 83%; 蒋高明等^[80]在美国生物圈 2 号中实 验发现高浓度的 CO₂对于荒漠植物或雨林植物的 WUE 都有促进作用,但影响的程度存在差异。然而, Tang 等^[19]在研究过去十年全球 WUE 变化时发现,在自然因素和人类活动作用下,尽管 CO₂浓度上升,但是全球 WUE 有明显下降的趋势,猜测持续的植被减少引起的土地覆被变化是影响过去十年全球 WUE 的主要因素 之一。

2.3 WUE 对水分的响应

可供植被利用的水分(包括大气湿度、降水、土壤含水量等)是影响生态系统 WUE 的重要因素^[31,59]。有些研究表明,大气湿度会通过制约植物体内水分向外蒸腾,进而影响植物的蒸腾速率,但对光合作用并无显著影响^[9]。因此,空气中湿度的增加对植物 WUE 有促进作用^[66-67],当空气中湿度高,蒸散过程减缓,植物 WUE 会因此有所增加^[65]。

通常降水量适当升高有利于植被 WUE,但降水量过高对植被 WUE 不利^[21,26,37,48]。在降水量不同的地区 WUE 的表现各不相同。仇宽彪^[75]、Xue^[41]等发现 WUE 与年均降水的关系并非线性,其他研究人员也有类似 的发现^[24,81-82]。在中国,年降水量小于 627mm 的地区,两者呈现显著正相关(*R*²=0.9,*P*<0.01),年降水量大 于 627mm 的地区,两者呈现显著负相关(*R*²=0.9,*P*<0.01);在全球范围,当年降水量低于 2352mm 时,WUE 会 随降水的增加而增加,当年降水量高于 4450mm 时,WUE 会随降水的增加而减少增加参考文献^[41]。在降水量较少的地区,降水增加会促进植物光合作用,致使 GPP 大幅增加,而 ET 的增幅较小,使得降水量较少的地 区 WUE 增加;而对于降水量较多的地区,相同增幅的降水量对 GPP 的促进作用较小,但大大增加了可用于蒸发的水量,使得该地区的 WUE 降低^[21],降水量过高会使得 WUE 逐渐降低^[48]。

降水除了可以直接影响 WUE,还可以通过调节土壤蒸发进而影响生态系统 WUE^[13,83]。土壤蒸发量与降 水之间存在一定的时间滞后性,降水期间土壤蒸发较小,而较低的土壤蒸发导致 WUE 在降雨时值呈现出较 高水平^[13]。

2.4 WUE 对干旱的响应

干旱是对水循环的间歇性干扰,对陆地生态系统碳水循环有深刻影响^[42]。目前,碳水循环耦合对干旱响 应的基本机制仍需深入研究,WUE对不同干旱情况的响应有所差别^[41-43]。2001年中国北方大部分如内蒙 古,东北和华北等地发生干旱^[84],其中东北地区干旱致使WUE增加;然而,在内蒙古北部的夏季轻度和秋季 中度干旱导致WUE下降,华北的严重干旱使该地WUE下降超过20%,而东北北部的严重干旱并未导致其 WUE有显著的变化^[43]。因此,两者之间定性表述为WUE对不同干旱情况表现出不同的响应。

为了验证干旱与 WUE 两者之间的定量关系,有研究利用不同表征干湿情况的指数,例如湿度指数(Wetness Index, WI),帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)等,定量研究干旱与 WUE 之间的关系。Yang 等^[42]在全球尺度探究了 WUE 与 WI 之间的关系,结果表明,在全球 82%的干旱区两者呈现负相关关系,在全球 77%的半干旱/半湿润地区,两者呈现正相关关系,而在湿润地区的大部分地区呈现正相关关系,但也有小部分地区表现为负相关。这可能是由于在湿润/半湿润地区,空气湿度或土壤湿度增加,使得植物气孔导度增大,蒸腾作用变强,从而降低了 WUE,使两者呈现负相关关系^[85]。同样,在干旱地区,WUE 和 PDSI 之间呈现负相关关系^[42,72],在湿润地区两者没有表现出明显的相关关系^[42],表明干旱对非水限制区域的 WUE 影响是有限的。从 WUE 表现情况的对比来看,这些地区的生态系统对干旱的敏感性不同。干旱地区的植被已经适应干旱缺水的环境,具有较大的干旱耐受性^[86-87],因此常表现出较高的 WUE^[70,88]。

除此以外,许多研究表明,干旱地区的生态系统 WUE 存在"累积滞后效应",对 WUE 有重要的影响^[42-43,89-90]。Yang 等^[42]指出一种累积滞后效应模式:当年干旱对 WUE 的影响与前一年干旱对 WUE 的影响

表现相反,当年干旱对 WUE 的影响程度相比前一年更大。Liu^[43]指出在中国东南部,累积滞后时间相对较短,一般在1—3个月,在西南地区较长为6—9个月,而内蒙古、青藏高原等以草原主导地区对干旱做出反应的时间最长,超过9个月。

2.5 WUE 对辐射的响应

辐射强度是植物光合作用的重要因素之一,同样对植物 WUE 产生重要影响。徐晓桃等^[14]发现黄河源区 植被 WUE 与太阳辐射的相关性较高;郑有飞等^[91]发现,小麦 WUE 存在类似于"光饱和点"的光强临界值; Xue 等^[41]在研究全球植被 WUE 时发现在太阳辐射低于 242.2W/m²的地区,WUE 随着太阳辐射的增加呈现 增加的趋势,并在 242.2W/m²时到达最大值,超过临界值后,WUE 呈现下降的趋势。

很多研究表明,天气状况会影响植被水分利率效率。阴天植物辐射利用率有增大的趋势^[92-93],当天空有一定云量时,植物生态系统碳的净吸收量有明显增多,原因是植物冠层接收到的太阳辐射得到了更为均匀的重新分配^[94-95]。阴天 WUE 有增大的趋势^[24,73],这是因为多云的条件提高了光散射的能力,使冠层中有更多的面积进行了光合作用。此外,太阳辐射强弱也会受到大气中的气溶胶含量的影响,进而影响生态系统生产力^[96-97]。气溶胶的存在增强了太阳光的散射,使得生态系统生产力增加,可以提高 WUE。多云条件会减弱气溶胶对光散射的贡献,从而使得 WUE 下降^[98]。因此,WUE 对太阳辐射响应的原因解释需要多方面的考虑。 2.6 气候因子的综合作用

以上讨论的单因子对植被 WUE 的影响是一种理想情况,事实上各因子总是协同综合影响,引起植被 WUE 发生变化^[16,99]。目前,CO₂浓度增加和气候变暖是全球气候变化的主要特征^[100],这两者对植物 WUE 有 着重要的影响。CO₂浓度的升高能够降低气孔导度和蒸散过程,提高植物光合作用,从而提高植物 WUE;而温 度升高又会增大气孔导度、蒸散作用,在一定程度上会抵消 CO₂浓度对植物 WUE 的影响,因此各个因子间的 协同作用对植物 WUE 的变化情况复杂^[3]。

3 研究趋势与展望

近年来,区域尺度 WUE 的研究也逐渐起步,在生态系统尺度上的研究深度和广度需要进一步深入和扩展^[13]。为更好的理解生态系统 WUE,实现生态系统恢复与节水保水之间的可持续发展,应对全球变化带来的挑战,仍需针对长时间序列 WUE 与气候要素的关系、土地利用/覆被变化对 WUE 的影响及其对气候反馈和多尺度 WUE 综合研究等几个方向进行研究。

3.1 长时间序列 WUE 与气候要素的关系研究

生态系统长时序的研究对于了解生态环境变化过程、揭示全球气候变化规律有着重要的作用^[101]。WUE 可以用来表征生态系统对气候变化的敏感程度,对WUE长时间序列的研究有助于宏观探究生态系统变化背 后气候变化的影响,揭示气候因子对WUE的作用。同时,随着全球气候环境不断变化,气候因子对生态系统 WUE的影响将成为人们关注的重点之一。

由于数据和方法的局限性,目前对于生态系统 WUE 多集中在短时间、小范围和单因子研究中。全球温度升高、CO₂浓度增加、降水变化和氮沉降等重要气候因子及其协同作用对 WUE 都存在直接或间接的影响。缺乏长时序生态系统 WUE 观测资料的现状,使得气候变化对生态系统 WUE 的影响研究无法深入分析。因此,长时间序列 WUE 与气候要素的关系研究还需进一步发展。

3.2 土地利用/覆被变化对 WUE 的影响及其对气候反馈研究

土地利用/覆被变化(Land-use and land-cover change, LUCC)^[102]能够影响陆地表面生物地球化学过程以及生物物理过程,进而对生态系统碳水循环产生重要影响^[103-104],这将会对生态系统WUE产生直接影响。地表植被的变化,例如植树造林,会引起空气湿度、降水和蒸散作用的变化,从而影响了当地水循环^[105],对WUE产生影响。城镇化的推进使得地物类型发生改变,包括人工地表的增加、原生植被的破坏、新生植物的更替等变化,导致区域生态系统生产力改变,最终影响到WUE^[106-108]。此外,地表植被变化引起WUE的改变会造成

蒸散和空气湿度的改变,从而会进一步影响到环境温度和气压等气象要素,对气候产生反馈作用。

目前研究 LUCC 对区域尺度 WUE 影响的研究尚不多见,而涉及 LUCC 对 WUE 的影响及其进一步对气候 反馈的研究则更少。因此,以后一方面可以加强对生态系统 WUE 有关 LUCC 的驱动力研究,另一方面还可以 加强其对气候因子的反馈研究。

3.3 多尺度 WUE 综合研究

在全球气候变化背景下,WUE 研究已经成为农业、生态、地球等学科研究的热点^[109],不同学科之间的研究角度和侧重点有所不同,研究范畴也有所不同。农学侧重叶片和植株尺度的 WUE 研究用以选育良种和指导田间管理^[7,12];生态学对群落尺度 WUE 研究以理解植物对环境的适应性^[110];地理学和生态学侧重于对景观或区域尺度 WUE 研究^[14,111]。不同学科在自己的领域中对 WUE 进行了研究,并在各自的尺度上取得了相应的研究成果,但由于不同尺度上 WUE 涉及不同的生物和生态过程,如何将个体水平 WUE 上推至区域乃至全球仍然面临重大挑战。

此外,目前多数研究限定于短时间尺度和个别站点,不同时空尺度 WUE 的综合研究还有所欠缺。建立 不同尺度之间的联系与转化过程,多尺度的 WUE 综合研究有助于深入理解生态系统碳水循环过程、预测未 来全球气候变化对生态系统 WUE 可能造成的影响,这是未来有关 WUE 的重要研究内容之一。

参考文献(References):

- Leemans R, Eickhout B. Another reason for concern: regional and global impacts on ecosystems for different levels of climate change. Global Environmental Change, 2004, 14(3): 219-228.
- [2] Huang M T, Piao S L, Sun Y, Ciais P, Cheng L, Mao J F, Poulter B, Shi X Y, Zeng Z Z, Wang Y P. Change in terrestrial ecosystem water-use efficiency over the last three decades. Global Change Biology, 2015, 21(6): 2366-2378.
- [3] 王庆伟, 于大炮, 代力民, 周莉, 周旺明, 齐光, 齐麟, 叶雨静. 全球气候变化下植物水分利用效率研究进展. 应用生态学报, 2010, 21 (12): 3255-3265.
- [4] Gang C C, Wang Z Q, Chen Y Z, Yang Y, Li J L, Cheng J M, Qi J G, Odeh I. Drought-induced dynamics of carbon and water use efficiency of global grasslands from 2000 to 2011. Ecological Indicators, 2016, 67: 788-797.
- [5] Ito A, Inatomi M. Water-use efficiency of the terrestrial biosphere: a model analysis focusing on interactions between the Global Carbon and Water Cycles. Journal of Hydrometeorology, 2012, 13(2): 681-694.
- [6] Chapin III F S, Carpenter S R, Kofinas G P, Folke C, Abel N, Clark W C, Olsson P, Smith D M S, Walker B, Young O R, Berkes F, Biggs R, Grove J M, Naylor R L, Pinkerton E, Steffen W, Swanson F J. Ecosystem stewardship: sustainability strategies for a rapidly changing planet. Trends in Ecology & Evolution, 2010, 25(4): 241-249.
- [7] 王会肖, 刘昌明. 作物水分利用效率内涵及研究进展. 水科学进展, 2000, 11(1): 99-104.
- [8] 熊伟,王彦辉,于澎涛.树木水分利用效率研究综述.生态学杂志,2005,24(4):417-421.
- [9] 胡化广,张振铭,吴生才,季芳芳.植物水分利用效率及其机理研究进展.节水灌溉,2013,(3):11-15.
- [10] 曹生奎, 冯起, 司建华, 常宗强, 席海洋, 卓玛错. 植物水分利用效率研究方法综述. 中国沙漠, 2009, 29(5): 853-858.
- [11] 王斌瑞,王百田.黄土高原径流林业.北京:中国林业出版社,1996:145-148.
- [12] 胡中民,于贵瑞,王秋凤,赵风华.生态系统水分利用效率研究进展.生态学报,2009,29(3):1498-1507.
- [13] 周洁. 北京大兴杨树人工林生态系统水分利用效率研究[D]. 北京:北京林业大学, 2013.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 李荣生,许煌灿,尹光天,杨锦昌,李双忠.植物水分利用效率的研究进展.林业科学研究,2003,16(3):366-371.
- [17] 刘文兆. 作物生产、水分消耗与水分利用效率间的动态联系. 自然资源学报, 1998, 13(1): 23-27.
- [18] Sun Y, Piao S L, Huang M T, Ciais P, Zeng Z Z, Cheng L, Li X R, Zhang X P, Mao J F, Peng S S, Poulter B, Shi X Y, Wang X H, Wang Y P, Zeng H. Global patterns and climate drivers of water-use efficiency in terrestrial ecosystems deduced from satellite-based datasets and carbon cycle models. Global Ecology and Biogeography, 2016, 25(3): 311-323.
- [19] Tang X G, Li H P, Desai A R, Nagy Z, Luo J H, Kolb T E, Olioso A, Xu X B, Yao L, Kutsch W, Pilegaard K, Köstner B, Ammann C. How is water-use efficiency of terrestrial ecosystems distributed and changing on Earth? Scientific Reports, 2014, 4: 7483-7493.
- [20] Zhang Z, Jiang H, Liu J X, Zhou G M, Liu S R, Zhang X Y. Assessment on water use efficiency under climate change and heterogeneous carbon dioxide in China terrestrial ecosystems. Procedia Environmental Sciences, 2012, 13: 2031-2044.
- [21] Tian H Q, Chen G S, Liu M L, Zhang C, Sun G, Lu C Q, Xu X F, Ren W, Pan S F, Chappelka A. Model estimates of net primary productivity,

38 卷

evapotranspiration, and water use efficiency in the terrestrial ecosystems of the southern United States during 1895-2007. Forest Ecology and Management, 2010, 259(7): 1311-1327.

- [22] 李放, 沈彦俊. 地表遥感蒸散发模型研究进展. 资源科学, 2014, 36(7): 1478-1488.
- [23] 李明旭,杨延征,朱求安,陈槐,彭长辉.气候变化背景下秦岭地区陆地生态系统水分利用率变化趋势.生态学报,2016,36(4): 936-945.
- [24] 李辉东,关德新,袁凤辉,王安志,金昌杰,吴家兵,李峥,井艳丽.科尔沁草甸生态系统水分利用效率及影响因素.生态学报,2015,35 (2):478-488.
- [25] 安佑志,高炜,高志强,施润和.中国北方地区秋季植被变化及对气候变化的响应研究.测绘与空间地理信息,2016,39(11):25-29, 35-35.
- [26] 李肖娟,张福平,王虎威,雷声剑,高张.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.中国沙漠,2017,37(4): 733-741.
- [27] 郑景云, 郝志新, 方修琦, 葛全胜. 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征. 地理科学进展, 2014, 33(1): 3-12.
- [28] 陈新光,潘蔚娟,张江勇,罗晓玲. 气候显著变暖使广州极端气候事件增多. 广东气象, 2007, 29(2): 24-25.
- [29] 王冀, 蒋大凯, 张英娟. 华北地区极端气候事件的时空变化规律分析. 中国农业气象, 2012, 33(2): 166-173.
- [30] 陈洪滨, 刁丽军. 2004年的极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾. 气候与环境研究, 200, 10(1): 140-144.
- [31] 王云霓,熊伟,王彦辉,于澎涛,徐丽宏,左海军,曹恭祥,孙浩.干旱半干旱地区主要树种叶片水分利用效率研究综述.世界林业研究, 2012,25(2):17-23.
- [32] Boutraa T. Improvement of water use efficiency in irrigated agriculture: a review. Journal of Agronomy, 2010, 9(1): 1-8.
- [33] Zhang Z B, Xu P, Shao H B, Liu M J, Fu Z Y, Chu L Y. Advances and prospects: Biotechnologically improving crop water use efficiency. Critical Reviews in Biotechnology, 2011, 31(3): 281-293.
- [34] Mei X R, Zhong X L, Vincent V, Liu X Y. Improving Water Use Efficiency of Wheat Crop Varieties in the North China Plain: Review and Analysis. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(7): 1243-1250.
- [35] 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), 2015.
- [36] 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.
- [37] 仇宽彪,成军锋,贾宝全.中国中东部农田作物水分利用效率时空分布及影响因子分析.农业工程学报,2015,31(11):103-109.
- [38] Amthor J S, Baldocchi D D. Terrestrial higher plant respiration and net primary production//Roy J, Saugier B, Mooney H A, eds. Terrestrial Global Productivity. San Diego, California, USA: Academic Press, 2001: 33-59.
- [39] 于贵瑞,孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法. 北京:高等教育出版社, 2006.
- [40] Lu X L, Zhuang Q L. Evaluating evapotranspiration and water-use efficiency of terrestrial ecosystems in the conterminous United States using MODIS and AmeriFlux data. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1924-1939.
- [41] Xue B L, Guo Q H, Otto A, Xiao J F, Tao S L, Li L. Global patterns, trends, and drivers of water use efficiency from 2000 to 2013. Ecosphere, 2015, 6(10): 1-18.
- [42] Yang Y T, Guan H D, Batelaan O, McVicar T R, Long D, Piao S L, Liang W, Liu B, Jin Z, Simmons C T. Contrasting responses of water use efficiency to drought across global terrestrial ecosystems. Scientific Reports, 2016, 6: 23284-23291.
- [43] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, Zhou Y L, Wang S Q, Wu X C. Water use efficiency of China's terrestrial ecosystems and responses to drought. Scientific Reports, 2015, 5: 13799-13811.
- [44] 刘敏. 基于 RS 和 GIS 的陆地生态系统生产力估算及不确定性研究——以青藏高原草地样带为例[D]. 南京:南京师范大学, 2008.
- [45] 李红琴,李英年,张法伟,刘晓琴,吴启华,毛绍娟. 高寒草甸植被生产量年际变化及水分利用率状况. 冰川冻土, 2013, 35(2): 475-482.
- [46] 周宇. 中亚干旱区植被退化及水分利用特征时空格局分析[D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [47] 张春敏,梁川,龙训建,卫仁娟.江河源区植被水分利用效率遥感估算及动态变化.农业工程学报,2013,29(18):146-155.
- [48] 位贺杰,张艳芳,董孝斌,鲁纳川,王雪超. 渭河流域植被 WUE 遥感估算及其时空特征. 自然资源学报, 2016, 31(8): 1275-1288.
- [49] Potter C S, Randerson J T, Field C B, Matson P A, Vitousek P M, Mooney H A, Klooster S A. Terrestrial ecosystem production: A process model based on global satellite and surface data. Global Biogeochemical Cycles, 1993, 7(4): 811-841.
- [50] 张远东,庞瑞,顾峰雪,刘世荣.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.生态学报,2016,36(6):1515-1525.
- [51] 卢玲,李新,黄春林, Veroustraete F. 中国西部植被水分利用效率的时空特征分析. 冰川冻土, 2007, 29(5): 777-784.
- [52] Cao M K, Woodward F I. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. Global Change Biology, 1998, 4(2): 185-198.
- [53] Liu J, Chen J M, Cihlar J, Park W M. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs. Remote Sensing of Environment, 1997, 62(2): 158-175.
- [54] Foley J A, Prentice I C, Ramankutty N, Levis S, Pollard D, Sitch S, Haxeltine A. An integrated biosphere model of land surface processes,

terrestrial carbon balance, and vegetation dynamics. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(4): 603-628.

- [55] Veroustraete F, Patyn J, Myneni R B. Estimating net ecosystem exchange of carbon using the normalized difference vegetation index and an ecosystem model. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(1): 115-130.
- [56] Landsberg J J, Waring R H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. Forest Ecology and Management, 1997, 95(3): 209-228.
- [57] Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M. Landscape Heterogeneity and Ecosystem Dynamics// Chapin III F S, Matson P A, Vitousek P M, eds. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2011; 369-397.
- [58] 王昭生. 1949-2008 年东亚区域陆地生态系统 NPP 和 GPP 的时空格局演变[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2012.
- [59] Zhou M, Zhou S S, Wang J X, Zhang Z W, Yang J H. Research advance on influencing factors of crop water use efficiency. Agricultural Science and Technology, 2014, 15(11): 1967-1976.
- [60] 肖春旺. 模拟降水量对毛乌素沙柳幼苗蒸发蒸腾的潜在影响. 草地学报, 2001, 9(2): 121-127.
- [61] Lessin R C, Ghini R. Efeito do aumento da concentração de CO₂ atmosférico sobre o oídio e o crescimento de plantas de soja. Tropical Plant Pathology, 2009, 34(6): 385-392.
- [62] Prior S A, Runion G B, Marble S C, Rogers H H, Gilliam C H, Torbert H A. A review of elevated atmospheric CO₂ effects on plant growth and water relations: implications for horticulture. Hortscience, 2011, 46(2): 158-162.
- [63] 郑凤英, 彭少麟. 植物生理生态指标对大气 CO,浓度倍增响应的整合分析. 植物学报, 2001, 43(11): 1101-1109.
- [64] 刘月岩,乔匀周,董宝娣,师长海,翟红梅,李东晓,司福艳,刘孟雨. CO₂浓度升高对小麦水分利用效率的影响研究综述. 气候变化研究快报, 2013, 2(1): 9-14.
- [65] 王梅,王建波.森林内气象因素和蒸散发的观测实验.黑龙江水专学报,2005,32(2):21-22,25-25.
- [66] 黄迪,张佳宝,张丛志,李玮.不同大气湿度与氮肥水平对夏玉米苗期水分利用效率的影响.玉米科学,2012,20(1):123-127.
- [67] 黄占斌,山仑.土壤大气湿度组合对玉米生长和 WUE 效应研究.西北植物学报,1998,18(2):160-164.
- [68] 周洁, 张志强, 孙阁, 方显瑞, 查同刚, 张燕, 王小平, 陈俊崎, 陈吉泉. 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应. 生态学报, 2013, 33(5): 1465-1474.
- [69] Ogaya R, Peñuelas J. Comparative field study of *Quercus ilex* and *Phillyrea latifolia*: photosynthetic response to experimental drought conditions. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50(2): 137-148.
- [70] 陈世苹. 内蒙古锡林河流域主要植物种、功能群和群落水分利用效率的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(植物研究所), 2003.
- [71] 郑淑霞.黄土高原植物叶片光合与化学计量特征的时空响应与适应机制[D].西安:中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,2008.
- [72] Huang L, He B, Han L, Liu J J, Wang H Y, Chen Z Y. A global examination of the response of ecosystem water-use efficiency to drought based on MODIS data. Science of the Total Environment, 2017, 601-602: 1097-1107.
- [73] 陈丹丹, 欧光龙, 陈金龙, 柳国元, 李齐勤, 张时豪, 郑元. 不同天气条件对云南4个主要造林树种幼林光合特性的影响. 西南林业大学 学报, 2016, 36(5): 32-38.
- [74] 马利民, 刘禹, 赵建夫. 贺兰山油松年轮中稳定碳同位素含量和环境的关系. 环境科学, 2003, 24(5): 49-53.
- [75] 仇宽彪,成军锋.陕西省植被水分利用效率及与气候因素的关系.水土保持研究, 2015, 22(6): 256-260.
- [76] Zhu Q A, Jiang H, Peng C H, Liu J X, Wei X H, Fang X Q, Liu S R, Zhou G M, Yu S Q. Evaluating the effects of future climate change and elevated CO₂ on the water use efficiency in terrestrial ecosystems of China. Ecological Modelling, 2011, 222(14): 2414-2429.
- [77] 刘玉洁,陶福禄.作物水分利用效率对温度和 CO₂浓度升高的响应研究进展.地理科学进展, 2013, 32(3):416-424.
- [78] Keenan T F, Hollinger D Y, Bohrer G, Dragoni D, Munger J W, Schmid H P, Richardson A D. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. Nature, 2013, 499(7458); 324-327.
- [79] Li J H, Erickson J E, Peresta G, Drake B G. Evapotranspiration and water use efficiency in a Chesapeake Bay wetland under carbon dioxide enrichment. Global Change Biology, 2010, 16(1): 234-245.
- [80] 蒋高明,林光辉, Marino B D V. 美国生物圈二号内生长在高 CO₂浓度下的 10 种植物气孔导度、蒸腾速率及水分利用效率的变化. 植物学报, 1997, 39(6): 546-553.
- [81] Hu Z M, Yu G R, Fan J W, Zhong H P, Wang S Q, Li S G. Precipitation-use efficiency along a 4500-km grassland transect. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(6): 842-851.
- [82] 穆少杰,周可新,齐杨,陈奕兆,方颖,朱超.内蒙古植被降水利用效率的时空格局及其驱动因素.植物生态学报,2014,38(1):1-16.
- [83] 倪盼盼,朱元骏,巩铁雄.黄土塬区降水变化对冬小麦土壤耗水特性及水分利用效率的影响.干旱地区农业研究, 2017, 35(4):80-87.
- [84] Liu Y, Zhou Y, Ju W, Wang S, Wu X, He M, Zhu G. Impacts of droughts on carbon sequestration by China's terrestrial ecosystems from 2000 to 2011. Biogeosciences, 2014, 11(10): 2583-2599.
- [85] Farquhar G D, O'Leary M H, Berry J A. On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. Australian Journal of Plant Physiology, 1982, 9(2); 121-137.
- [86] Fischer R A, Turner N C. Plant productivity in the arid and semiarid zones. Annual Review of Plant Physiology, 1978, 29(1): 277-317.

9

- [88] Zhang X, Moran M S, Zhao X, Liu S H, Zhou T, Ponce-Campos G E, Liu F. Impact of prolonged drought on rainfall use efficiency using MODIS data across China in the early 21st century. Remote Sensing of Environment, 2014, 150: 188-197.
- [89] Yu Z, Wang J X, Liu S R, Rentch J S, Sun P S, Lu C Q. Global gross primary productivity and water use efficiency changes under drought stress. Environmental Research Letters, 2017, 12(1): 014016.
- [90] 郑有飞,万长建,颜景义,廖志鸿.小麦的水分利用效率及其最优化问题.中国农业气象,1997,18(4):13-17,28-28.
- [91] Migliavacca M, Meroni M, Manca G, Matteucci G, Montagnani L, Grassi G, Zenone T, Teobaldelli M, Goded I, Colombo R, Seufert G. Seasonal and interannual patterns of carbon and water fluxes of a poplar plantation under peculiar eco-climatic conditions. Agricultural and Forest Meteorology, 2009, 149(9): 1460-1476.
- [92] Gu L H, Baldocchi D, Verma S B, Black T A, Vesala T, Falge E M, Dowty P R. Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2002, 107(D6): ACL 2-1-ACL 2-23.
- [93] 张弥,于贵瑞,张雷明,孙晓敏,温学发,韩士杰.太阳辐射对长白山阔叶红松林净生态系统碳交换的影响. 植物生态学报, 2009, 33 (2): 270-282.
- [94] 刘佳,同小娟,张劲松,孟平,李俊,郑宁.太阳辐射对黄河小浪底人工混交林净生态系统碳交换的影响.生态学报,2014,34(8): 2118-2127.
- [95] Knohl A, Baldocchi D D. Effects of diffuse radiation on canopy gas exchange processes in a forest ecosystem. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(G2): G02023.
- [96] Gu L, Baldocchi D D, Wofsy S C, Munger J W, Michalsky J J, Urbanski S P, Boden T A. Response of a deciduous forest to the mount pinatubo eruption: enhanced photosynthesis. Science, 2003, 299(5615): 2035-2038.
- [97] Lu X L, Chen M, Liu Y L, Miralles D G, Wang F M. Enhanced water use efficiency in global terrestrial ecosystems under increasing aerosol loadings. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 237-238: 39-49.
- [98] 周广胜,张新时,高素华,白克智,延晓东,郑元润.中国植被对全球变化反应的研究.植物学报,1997,39(9):879-888.
- [99] 沈永平,王国亚. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.
- [100] 马明国, 宋怡, 王旭峰, 韩辉邦, 于文凭. AVHRR、VEGETATIoN 和 MODIS 时间系列遥感数据产品现状与应用研究进展. 遥感技术与应用, 2012, 27(5): 663-670.
- [101] Lambin E F, Baulies X, Bockstael N, Fischer G, Krug T, Leemans R, Moran E F, Rindfuss R R, Sato Y, Skole D, Turner II B L, Vogel C. Land-Use and Land-Cover Change (LUCC): Implementation Strategy. IGBP Report No 48, IHDP Report No 10, Stockholm: IGBP, 1999.
- [102] Tian H Q, Lu C Q, Chen G S, Xu X F, Liu M L, Ren W, Tao B, Sun G, Pan S F, Liu J Y. Climate and land use controls over terrestrial water use efficiency in monsoon Asia. Ecohydrology, 2011, 4(2): 322-340.
- [103] Tian H Q, Melillo J M, Kicklighter D W, Pan S F, Liu J Y, McGuire A D, Moore III B. Regional carbon dynamics in monsoon Asia and its implications for the global carbon cycle. Global and Planetary Change, 2003, 37(3/4): 201-217.
- [104] 江波.确定中国北方地区植被变化对近地表气候反馈的观测证据[D].北京:北京师范大学, 2012.
- [105] Milesi C, Elvidge C D, Nemani R R, Running S W. Assessing the impact of urban land development on net primary productivity in the southeastern United States. Remote Sensing of Environment, 2003, 86(3): 401-410.
- [106] Pei F S, Xia Li, Liu X P, Wang S J, He Z J. Assessing the differences in net primary productivity between pre-and post-urban land development in China. Agricultural and Forest Meteorology, 2013, 171-172: 174-186.
- [107] Buyantuyev A, Wu J. Urbanization alters spatiotemporal patterns of ecosystem primary production: A case study of the Phoenix metropolitan region, USA. Journal of Arid Environments, 2009, 73(4/5): 512-520.
- [108] Zhang Z, Jiang H, Liu J X, Zhu Q A, Wei X H, Zhou G M, Liu S R, Zhang X Y. Modeling the spatial-temporal dynamics of water use efficiency in Yangtze River Basin using IBIS model. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(5): 246-253.
- [109] Blicker P S, Olson B E, Wraith J M. Water use and water-use efficiency of the invasive Centaurea maculosa and three native grasses. Plant and Soil, 2003, 254(2): 371-381.
- [110] 张良侠, 胡中民, 樊江文, 邵全琴, 唐风沛. 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. 地球科学进展, 2014, 29(6): 691-699.