

基于GIS的内蒙古自治区植被生态需水量研究

李原^{1,2}, 于瑞宏^{1,2}, 赵元真^{1,2}, 孙良麒^{1,2}, 庄帅^{1,2}, 葛铮^{1,2}

(1.内蒙古大学生态与环境学院, 内蒙古呼和浩特010021;

2.内蒙古自治区河流与湖泊生态重点实验室, 内蒙古呼和浩特010021)

摘要: [目地] 分析计算内蒙古自治区不同典型分区的植被生态需水量, 为该区域水资源管理和生态保护提供科学建议。[方法] 以Penman-Monteith公式为基础, 利用实测与多源遥感数据, 对1990—2020年内蒙古自治区4个典型区域(西部地区、中部地区、东部地区、东北部地区)植被生态需水量(ecological water requirement, EWR)和单位面积植被生态需水量(ecological water requirement for vegetation per unit area, ET)进行反演, 并分析其时空变化的主导因素。[结果] ①时间上, 30 a间EWR呈现先降后升的趋势, 就区域总量来看西部地区较为稳定, 维持在 $3.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 左右; 中部与东部地区在 $6.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 左右, 变化幅度较大, 年间最大变幅超 $1.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$; 东北部地区高, 且稳定在 $1.00 \times 10^{11} \text{ m}^3$ 左右。②空间上, 总体呈现出自西向东逐渐升高的态势且东西差异巨大, 东北部区单位面积植被生态需水量(ET)均值较西部地区高近250 mm。[结论] 降水蒸发主导下的气候因素与土地覆盖类型变化主导下的人为因素是内蒙古自治区植被生态需水量变化的关键因素, 后者影响程度要大于前者。

关键词: 生态需水量; 时空变化; 土壤含水量; 土地覆盖变化; 内蒙古自治区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)06-0324-12

中图分类号: X24, Q948, S152.7

文献参数: 李原, 于瑞宏, 赵元真, 等. 基于GIS的内蒙古自治区植被生态需水量研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(6): 324-335. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.06.038; Li Yuan, Yu Ruihong, Zhao Yuanzhen, et al. GIS-based study of ecological water requirement of vegetation in Inner Mongolia Autonomous Region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(6): 324-335.

GIS-based Study of Ecological Water Requirement of Vegetation in Inner Mongolia Autonomous Region

Li Yuan^{1,2}, Yu Ruihong^{1,2}, Zhao Yuanzhen^{1,2}, Sun Liangqi^{1,2}, Zhuang Shuai^{1,2}, Ge Zheng^{1,2}

(1. School of Ecology and Environment, Inner Mongolia University, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China;

2. Key Laboratory of River and Lake Ecology, Inner Mongolia Autonomous Region, Hohhot, Inner Mongolia 010021, China)

Abstract: [Objective] The ecological water requirement (EWR) of vegetation in different typical zones for the rational allocation of water resources in the Inner Mongolia Autonomous Region was analyzed and calculated to provide scientific suggestions for water resources management and ecological protection in this region. [Methods] Based on the Penman-Monteith formula, this study used measured and multi-source remote sensing data to invert EWR and the ecological water requirement per unit area (ET) for vegetation in four typical regions (western, central, eastern, and northeastern regions) of the Inner Mongolia Autonomous Region from 1990 to 2020. The dominant factors of spatiotemporal variation of ET were determined. [Results] ① EWR showed a trend of decreasing and then increasing over the 30-year study period, with the western region being more stable (maintaining an EWR of around $3.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$). The central and eastern regions had EWR of around $6.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$, with a large variation and a maximum

收稿日期: 2023-05-07

修回日期: 2023-06-09

资助项目: 国家自然科学基金项目“旱区浅水草型湖泊沉积物—水—气多界面碳通量驱动机制及时空异质性”(52279067), “水文条件—营养盐负荷交互作用下旱区浅水湖泊稳态转换驱动机制与调控”(51869014); 国家重点研发计划重点专项(2021YFC3201203); 内蒙古自治区重大专项(2020ZD0009); 内蒙古自治区应用与技术研发项目(2022QZBZ0003); 蒙古高原生态与资源利用教育部重点实验室开放课题(KF2020006)

第一作者: 李原(1997—), 男(汉族), 山东省青岛市人, 硕士研究生, 研究方向为遥感技术与应用。Email: 32015165@mail.imu.edu.cn.

通信作者: 于瑞宏(1978—), 女(汉族), 内蒙古自治区包头市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文学及水资源等方面的研究。Email: rhyu@imu.edu.cn.

variation of over $1.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$ between years. The northeastern region EWR values were higher and stable at around $1.00 \times 10^{11} \text{ m}^3$. ② EWR was higher in the east and lower in the west, and varied greatly from east to west, with the mean ET value in the northeastern region being nearly 250 mm higher than in the west. [Conclusion] The climatic factors (primarily precipitation and evaporation) and anthropogenic factors (primarily land cover type change) were the key factors for the change of ecological water requirement of vegetation in the Inner Mongolia Autonomous Region, with the latter being more influential than the former.

Keywords: ecological water requirement; spatiotemporal changes; soil moisture; land cover change; Inner Mongolia Autonomous Region

植被是生态建设的重要组成成分,研究植被生态需水量的意义在于更好地理解和管理区域内的水资源,以维护生态系统的稳定和健康。研究内蒙古自治区的植被生态需水量,可以帮助了解内蒙古自治区的水资源分布情况和植被的生态需求,为区域水资源的合理配置提供科学依据。同时,以生态缺水量为参考标准进行林草资源的利用与土地开发工作,可以有效避免出现大规模土地退化的现象。近年来,基于面积配额法、水量平衡法、潜水蒸发法、生物量法和 Penman-Monteith 公式等进行的植被生态需水量计算^[1-4]取得了一些较好的成果,但均存在一定的局限性。面积配额法需测量植被蒸散量和灌溉量,主要用于人工植被需水量计算;水分平衡法未考虑植被的生态特性;潜水蒸发法适用于干旱区植被生存主要依赖于地下水的情况;生物量法可用于估算较大区域植被生态需水量,但需要实测数据来校正^[5]。Penman-Monteith 方法以植被潜在蒸散量为基础,结合土壤和植被因素,具有很好的操作性,是目前最为常用的方法^[6-7],被广泛应用于农田、沙漠、草地、森林等地表覆盖类型,适用于人工植被与天然植被的生态需水量计算^[8-10]。

内蒙古自治区地处中国北部,由东到西干湿度变化明显,东北部部分区域属于湿润半湿润地区,中西部大部分属于干旱半干旱区。对内蒙古自治区植被生态需水量的研究取得了一些典型的成果。例如,宋孝玉等^[11]以鄂托克旗为研究对象,计算各草地类型的生态需水量,分析其平衡关系,体现了 Penman-Monteith 方法在天然植被生态需水量计算方面的优势;Zhang 等^[12]基于遥感卫星影像数据,借助不同用水量采用面积配额法,得出乌海市的生态需水量,为复杂地物下生态需水量计算提供了方法参考;Xie 等^[13]分析确定扎龙湿地生态环境适宜需水量和最小需水量,为沼泽型湿地生态需水量计算提供了一种准确的方法;郭克贞等^[14]以地带性草地牧草群落为对象,研究了可保持群落稳定的基本生态需水量和适宜生态需水量;周丹等^[15]采用潜水蒸发模型,计算西北

干旱区荒漠植被生态需水量,为较大空间范围内生态需水量计算提供了方法依据;Chi Dengkai 等^[16]将 Penman-Monteith 方法与地理信息系统和遥感技术相结合,计算植被系数以及土壤水分限制系数。在已有研究中,研究区域的空间尺度多集中在小范围或单个流域,所用方法在大范围复杂地类下很难具有普适性,且大多未考虑植被及土壤因素季节性变化的影响。为此,本研究基于的 Penman-Monteith 方法,结合 GIS 和遥感技术,计算了 1990—2020 年内蒙古自治区植被生态需水量,并分析了其 30 a 的时空变化趋势。本研究的内容包括:①基于气象、植被覆盖度、遥感土地覆盖类型数据,计算不同植被在年内不同时间点的调整系数;②借助雷达与光谱的多源遥感数据构建土壤水分反演模型,计算年内不同时间点的土壤水分限制系数;③按照行政区、主要土地覆盖类型、高程等数据,划定典型分区,计算不同分区的植被生态需水量,为区域水资源管理和生态保护提供合理建议。

1 研究区概况

内蒙古自治区位于 $97^{\circ}12' - 126^{\circ}04' \text{ E}$, $37^{\circ}24' - 53^{\circ}23' \text{ N}$,地处中国北部边境。内蒙古自治区现设有 12 个盟市,自西南向东北延伸呈狭长状,面积约 $1.18 \times 10^6 \text{ km}^2$ 。东、南、西依次与黑龙江、吉林、辽宁、河北、山西、陕西、宁夏及甘肃 8 省区毗邻,北与蒙古国、俄罗斯接壤,国境线长约 4 200 km。研究区横贯中国北方气候条件复杂多变,具有降水量少且不均、寒暑变化剧烈的气候特征。受地形的影响,自东向西降水量由 500 mm 递减至 50 mm 左右,蒸发量则相反,由 500 mm 增至 2 000 mm 以上^[17]。气候带由湿润、半湿润区逐步过渡到半干旱、干旱区。内蒙古自治区主要植被类型是草地和林地,草地面积约 $8.67 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国草地总面积的 1/4;林地面积约 $2.08 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国森林总面积的 11%,主要集中在研究区东北部的大兴安岭地区^[18];耕地面积约 $8.20 \times 10^6 \text{ hm}^2$,各盟市均有分布。研究区内高程变化显著。阿拉善盟以东至锡林郭勒盟各市处在蒙古高原上,高程约在

900~3 200 m,大兴安岭以东地区高程较低,高程约在 90~900 m,呼伦贝尔市西部地区高程较低,平均在 650~700 m。

2 数据和方法

2.1 数据与预处理

实测气象数据:1990—2020 年 4—10 月研究区内约 110 个气象站点的每日实测气象数据,来源于中国气象数据网,包括温度、气压、相对湿度、日照时数、降水、蒸发等,对数据进行异常值剔除以及数据插补汇总。

遥感数据包括归一化植被指数(NDVI)、地表温度(LST)、土壤含水量(SM)、土壤类型及物理参数、地表覆盖类型等,主要包括:①NDVI 数据来源于多个数据产品集,2000 年以前使用 GIMMS NDVI 产品,来自美国航空航天局全球监测与模型研究组;2000 年以后使用 MODIS 中国合成产品(来源于地理空间数据云)以及 MODIS NDVI 产品(来源于 USGS 官方数据网站);②LST 数据,2000 年以前来源于 GLASS 网站的 LST 数据集;2000 年以后来源于地理空间数据云的 MODIS 中国合成产品,以及 USGS 官方网站的 MODIS 地表温度产品;③SM 数据集,采用由 Chen 等通过神经网络对 11 个基于微波遥感的 SM 数据融合产品^[19];④土壤类型数据,基于世界土壤数据库(HWSD)的中国土壤数据集(v1.1)^[20],参考由中国科学院南京土壤研究所编制的 1:400 万中国土壤图^[21-22]得到,并进行了所需物理量的赋值与计算;⑤地表覆盖类型数据是在中科院 GlobeLand 30 数据的基础上,参考全球 30 m 精细地表覆盖产品^[23]以及通过 GEE 等技术手段得到的地表覆盖类型数据^[24]得到,并使用较高分辨率的遥感数据对争议性位置进行目视解译校正。遥感数据需要进行数据的重采样、重投影、拼接、裁剪以及异常值的剔除等操作。

2.2 植被生态需水量模型

植被生态需水主要受到植被类别、土壤水分以及气候要素的影响,本文基于联合国粮农组织(FAO)提出的植被生态需水量计算理论,在不同植被覆盖类型与土壤墒情下计算植被生态需水量(EWR, m^3),计算公式为:

$$EWR = A_p \cdot \sum_{n=1}^N ET_n \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: A_p 为面积(m^2); ET_n 为第 n 天的 ET(mm/d)。

在给定的气候条件下,若地区拥有广阔的土地、

充足的肥力、无病虫害以及适宜的土壤水分等,促进植被生长达到标准的健康生产条件^[25],植被蒸散率采用公式(2)计算;而在非标准条件下,植被生长受土壤含水量的影响,当土壤含水量低于某阈值时,植被受到水分胁迫,其影响程度由土壤水分限制系数(K_s)决定,植被蒸散率计算如公式(3)所示:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2)$$

$$ET = K_c \cdot K_s \cdot ET_0 \quad (3)$$

式中: K_c 为植被系数; K_s 为土壤水分限制系数; ET_0 为潜在蒸发量(mm/d); ET_c 是标准条件下的植被蒸散率(mm/d); ET_0 为潜在蒸发量(mm/day); ET 为非标准条件下的植被蒸散率(mm/d),在数值上等于日单位面积 EWR,结果部分使用 ET 代表单位面积年植被生态需水量(mm)进行分析。

基于 Penman-Monteith 方程^[25],使用实测气象数据计算^[26]潜在蒸发量,计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (4)$$

式中: Δ 为温度/饱和水汽压关系曲线在温度 T 处的切线斜率($K/^\circ C$); T 为平均气温($^\circ C$); G 为净辐射 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; G 为土壤热通量 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; γ 为湿度表常数($kPa/^\circ C$); e_s, e_a 分别为饱和水汽压与实际水汽压(kPa); u_2 为 2 m 处风速(m/s)。

采用分段单值平均作物系数法^[27]估算作物系数,植被全生长阶段的作物系数主要由生长初期植被系数 $K_{c,init}$,生长中期植被系数 $K_{c,mid}$ 和生长后期植被系数 $K_{c,end}$ 决定。植被生长初期根据润湿间隔和 ET_0 参考 FAO-56 标准确定 $K_{c,init}$ 。 $K_{c,mid}$ 分两种,非农田地带通过植被覆盖度计算如公式(5),农田地带 $K_{c,mid}$ 与 $K_{c,end}$ 的计算公式相同如公式(6):

$$K_{c,mid} = K_{c,min} + [K_{c,full} - K_{c,min}] \quad (5)$$

$$\min[1, 2f_p, (f_{p,eff})^{\frac{1}{1+h}}]$$

$$K_c = K_{c,table} + [0.04(u_2 - 2) - 0.004(RH_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (6)$$

式中: $K_{c,min}$ 为植被缺少时裸露土壤的最小植被系数; $K_{c,full}$ 为全覆盖条件下植被系数; f_p 为实际植被覆盖; $f_{p,eff}$ 为有效植被覆盖度; h 为生长中后期植被平均高度(m); $K_{c,table}$ 为植被系数计算初值,需要根据实际情况在 FAO-56 标准文件中查到(如表 1 所示)。

根据研究区气象数据以及实际调查情况来看,研究区内 4 月植被生长发育开始至 10 月植被生长发育基本停止。

表 1 不同地表覆盖类型优势植被各阶段植被系数 ($K_{c,table}$)

Table 1 Calculated value of vegetation ratio $K_{c,table}$ values for dominant vegetation at different stages for different land cover types

$K_{c,table}$	耕地	林地	草地	灌木	湿地
初期	0.15	0.42	0.3	0.17	1
中期	1.15	—	—	—	1.2
后期	0.5	0.65	0.45	0.5	1

表 1 所示内容为各种地表覆盖类型下优势作物的 K_c , 各行的含义略有不同其中 $K_{c,ini}$ 给出的是特定蒸发条件下的参考值 (表中仅为示例), $K_{c,mid}$ 与 $K_{c,end}$ 需要根据公式 (6) 结合气候因素进行参数率定, 林地、草地、灌木的 $K_{c,mid}$ 需要结合植被覆盖度计算 [公式 (5)]。

K_s 计算公式为^[28]:

$$K_s = \frac{\ln\left(\frac{S - S_w}{S^* - S_w} \times 100 + 1\right)}{\ln(101)} \quad (7)$$

式中: S 表示土壤实际含水量; S_w 表示土壤凋萎系数; 为临界土壤含水量, 其通常为田间持水量的 70% ~ 80%。在研究区内获取月尺度下的较高分辨率的土壤水分数据存在极大的困难。因此, 本文以 SM 数据集为基础进行数学建模, 选用温度干旱植被指数 (TVDI)^[29] 作为自变量进行建模, 以得到适用于内蒙古自治区的土壤含水量模型。相比于表现土壤热惯量^[30-31]、作物水分胁迫指数等^[32] 表征土地干旱程度的模型, 使用 TVDI 反演土壤含水量的优势在于: 数学模型形式简单, 模型参数可由遥感数据直接获得; 可满足在大尺度范围内、高时间分辨率下的使用要

求, 空间分辨率较高。

$$TVDI = \frac{T_s - T_{min}}{T_{max} - T_{min}} \quad (8)$$

式中; T_s 为地表温度; T_{max} 为干边方程; T_{min} 为湿边方程。

2.3 熵计算与非参数 Mann-Kendall 分析法

为得出植被生态需水量变化的主导因素, 使用相关系数法与熵权法^[33] 对 ET_0 , K_c , K_s , $K_c \times K_s$ 等各因子进行分析, 得到相关系数热度图以及各因子熵权, 确定在计算过程中起主导作用的因子。为分析生态需水量的时空变化趋势、标记重点变化区域, 采用 Mann-Kendall 法^[34] 对栅格数据进行趋势检验, 按照自然裂点法进行灰度分割得到重点变化区域。以上方法均使用 Python 语言进行封装计算, 具体公式参见 Li Qin Hai 等^[35] 与 Smith 等^[36] 文献。

3 结果与分析

依据上述公式计算植被生态需水量的关键因子 (ET_0 , K_c , K_s), 进而计算植被生态需水量 (ET , EWR), 并通过 Mann-Kendall 方法标记重点变化区域。以行政区划图为基础, 依据主要土地覆盖类型比例、植被覆盖度以及高程, 将研究区划分如下: I 西部地区。大面积覆盖有沙漠裸地与荒漠草地; II 中部地区。大量典型草地分布的区域; III 东部地区。降水量较为丰沛且林地耕地面积比重较大, 同时位于蒙古高原以下平均海拔远低于中西部地区; IV 东北部地区。含研究区内 80% 以上的林地。各典型区域边界如图 1 所示。由于数据量较大, 选择部分数据进行展示。

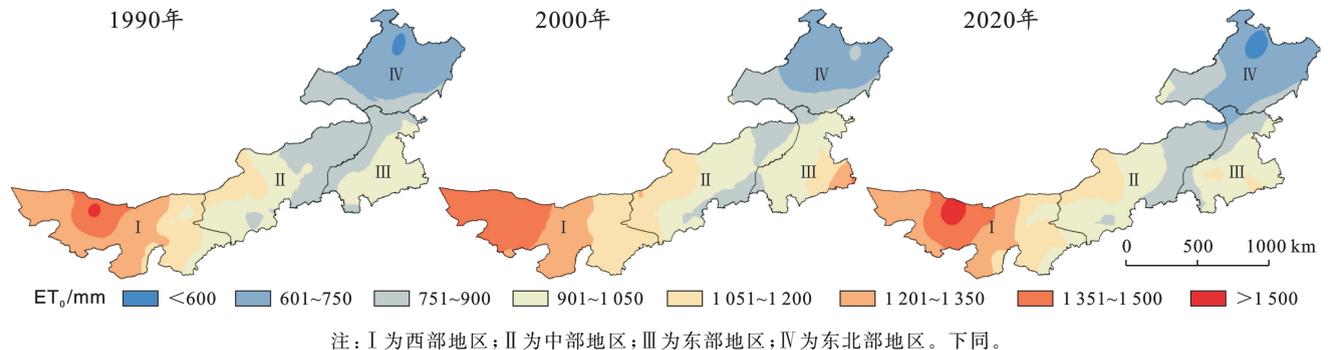


图 1 内蒙古自治区 ET_0 时空变化

Fig.1 Temporal and spatial variation of potential evaporation in Inner Mongolia Autonomous Region

3.1 潜在蒸发量 (ET_0) 与作物系数 (K_c)

如图 2 所示, ET_0 的时空变化具体表现为: 从时间上来看, ① 西部地区。1990—2000 年 ET_0 增加, ET_0 在 1 000 mm 以下的区域基本消失, 而大于 1 300 mm 的区域明显扩张。2000 年以后呈现稳定的趋势, 偶有较高的年份 (如 2020 年); ② 中部地区。

1990—2000 年 ET_0 小于 1 000 mm 的区域明显减少, 蒸发量呈现波动上升的趋势, 其在 2000 年左右达到最大值。2000 年以后, ET_0 在 1 000 mm 以下的区域明显增多, 其中部分区域降至 900 mm 以下, 基本呈现下降的趋势; ③ 东部地区。1990—2000 年 ET_0 在 600~1 000 mm 之间的区域明显减少, 部分区域

ET₀ 上升到 1 000 mm 以上。蒸发总量呈现波动上升趋势,但在 1997 年前后已有下降趋势。2000 年以后大部分区域 ET₀ 恢复至 1 000 mm 以下,呈现出波动下降的态势,但在 2012 年之后开始有所回升;④ 东北部区域。在不考虑极端年份的情况下,其 ET₀ 基本稳定在 900 mm 以下,蒸发总量在多年之间呈现波动稳定的态势。不同于时间变化趋势的两段性,从空间上来看,多年以来均呈现出明显的西高东低的态势。西部地区多年平均蒸发量在 1 100 mm 左右,中部地区与东部地区接近,在 900 mm 左右,东北部地

区 700 mm 左右。

依据土地覆盖类型数据、气象数据(相对湿度、风速等)、植被覆盖度数据、各地类下优势作物植被系数,计算年内作物系数,不同季节的 K_c (如图 2 所示)。作物系数在年内呈现出了先升后降的变化趋势,在植被生长中期达到最高,对应到实际情况基本上是在研究区的 7 月左右,具体到特定的地表覆盖类型可能有所差异(如湿地)。空间上基本呈现东高西低的变化趋势,局部地区的极值则主要以人为活动下的耕地、林地为主。

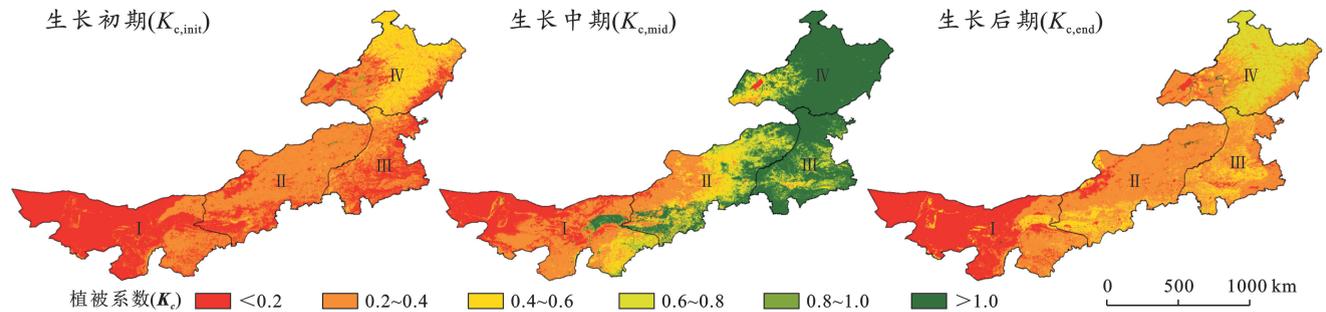


图 2 内蒙古自治区植被系数 (K_c) 的年内变化

Fig.2 Annual variation of K_c in Inner Mongolia Autonomous Region

3.2 土壤含水量(SM)反演与土壤水分限制系数(K_s)

在内蒙古自治区无精度较高且适用于大面积反演土壤含水量的模型,由于数据集的时间跨度无法涵盖 1990—2020 年的全部时间,因此选用数据集的部分数据进行建模。模型的构建分为数学建模与精度验证两部分。其中数学建模部分选用 2003—2016 年的数据,在研究区内进行随机选点,将随机点按照 2:1 划分训练集与测试集,使用训练集进行数学建模。精度验证部分:使用测试集进行初步验证,用来确定模型精度。同时使用未给建模过程提供数据的 2005 和 2015 年进行模型的可移植性检验,模型精度如表 2 所示。

$$SM = -0.56TVDI + 0.48 \quad (9)$$

表 2 土壤含水量反演模型精度

Table 2 Accuracy of soil moisture inversion model

数据集	相关系数	R^2	RMSE	p
训练集	-0.896	0.802	0.039	<0.01
测试集	-0.910	0.829	0.036	<0.01

模型如公式(9)所示,验证精度如表 2 所示。训练集的 R^2 达到 0.802, RMSE 仅 0.039。测试集的 R^2 达到 0.829, RMSE 仅 0.036。模型的可移植性如图 3 所示。 R^2 高于 0.8, RMSE 最少为 0.021, 证明该模型具有良好的可移植性,可用于建模数据集以外的时间

段的 SM 反演。该模型的优点是构造简单,适用于大面积,具有良好的可移植性。同时 TVDI 的反演理论本身比较成熟,在 MODIS 数据的支持下,可以实现土壤含水量反演的高空间和时间分辨率。结合土壤类型及物理参数计算研究区年内不同时期的 K_s , 结果如图 4 所示。 K_s 基本呈现出东高西低的趋势,与土壤水分的时空变化趋势大体相同。不同的是,由于土壤类型的地带性分布, K_s 会出现局部的极值,这是植被生态需水量局部极值出现的重要原因。其年内的变化依赖于蒸发降水,一般降水较多的月份及其相邻的月份 K_s 较高。

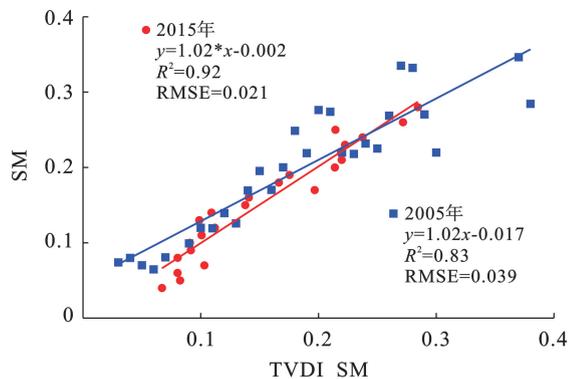


图 3 土壤含水量模型的可移植性检验

Fig.3 Portability test for soil moisture content modeling

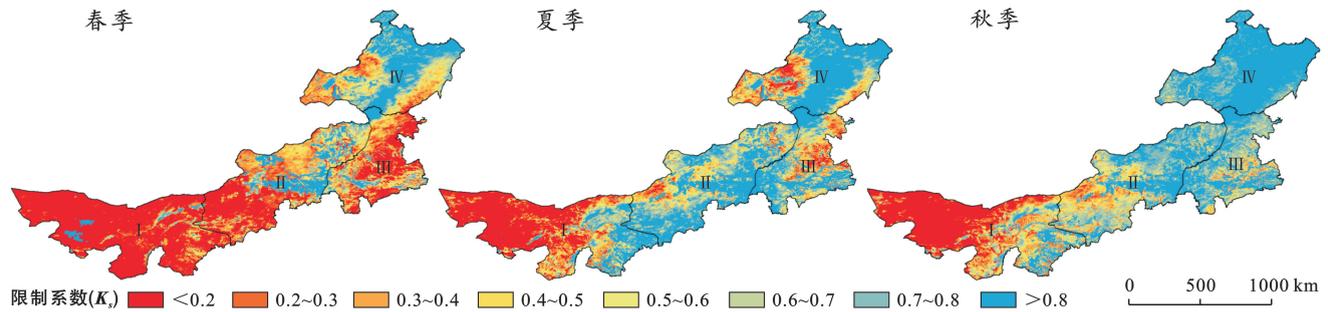


图 4 内蒙古自治区土壤水分限制系数时空变化

Fig.4 Spatial and temporal variations of soil moisture limitation coefficients in Inner Mongolia Autonomous Region

3.3 植被生态需水量

1990—2020 年单位面积植被生态需水量(ET)分布如图 5 所示,各分区年间植被生态需水量(EWR)变化如图 6 所示。

从时间上看:①西部地区。1990—2000 年 ET 在 200 mm 以上的区域明显减少,EWR 也呈现下降的趋势,最低与最高的差距近 $1.00 \times 10^{12} \text{ m}^3$;2000 年以后有所 ET 在 200 mm 以上的区域有所增加,EWR 呈现波动上升的趋势,但其幅度不大;西部地区在 30 a 内基本呈现出稳定的趋势。②中部地区。相比于西部地区,中部地区的变化趋势更加明显。1990—2000 年呈现出明显的下降趋势;至 2000 年 ET 在 200 mm 以上的区域所占比例基本降到 30 a 内的最低点,EWR 也在 2000 年降至最低;2000 年以后逐渐回升,至 2020 年 ET 在 400 mm 到 600 mm 的地区明显提升,EWR 接近 $8.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$,则呈现波动上升且波动幅度逐渐降低;③东部地区:其变化趋势与中部地区趋同,ET 大面积下降到 200 mm 以下,不同的是,1995 年左右 EWR 的降低趋势开始缓解,2000 年后开始缓步回升,至 2020 年大部分地区 ET 恢复到 300 mm 以上,EWR 超过 $7.00 \times 10^{10} \text{ m}^3$;④东北部地区:1990—2000 年 EWR 呈现出先升后降的趋势,

2000 年以后虽然有所波动,但整体变化不大,ET 常年稳定在 600~700 mm。

在空间上,ET 呈现自西向东逐渐增大的趋势,与 ET₀ 的分布趋势呈现负相关。东西差异巨大,ET 在大兴安岭南部达到最大值。自西向东 ET 的最大变化超过 500 mm。具体表现为:①西部干旱区。是研究区内 ET 最低值区域。ET 从阿拉善盟西部普遍小于 200 mm 逐渐增至与中部地区交界处的 300~400 mm;②中部地区。ET 呈现出东高西低且南高北低的分布趋势。中部地区包头市北部、呼和浩特市北部、乌兰察布市北部至锡林郭勒盟西部草原的植被覆盖度较低,其 ET 普遍低于 200 mm。包头市南部、呼和浩特市西南部、乌兰察布市南部 ET 在 300~400 mm。③东部地区。ET 呈北高南低的趋势。兴安盟北部,ET 最高在 600 mm 以上,其向南逐渐减少,通辽市与赤峰市少部分地区在 200 mm 以下,但大部分地区在 300~400 mm 范围内。至 2020 年东部地区 ET 在 300 mm 以上地区的比例明显高于中部地区;④东北部地区。ET 表现为东高西低。以林地为主要覆盖区域的大兴安岭部分的 ET 稳定在 600 mm 以上,呼伦贝尔草原部分基本维持在 300 mm 左右,部分地区在 200 mm 左右。

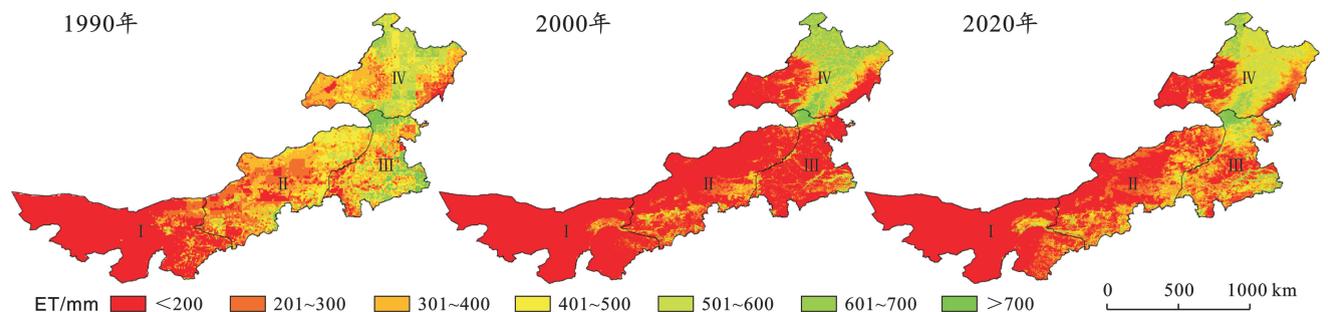


图 5 1990—2020 年内蒙古自治区植被生态需水量

Fig.5 Ecological water requirement of vegetation in Inner Mongolia Autonomous Region during 1990—2020

基于 Mann-Kendall 方法^[37] 逐像元进行的趋势分析如图 7 所示。结合土地利用类型来看,2000 年

以前,ET 总体呈现增加趋势的区域主要集中在中西部地区的耕地和东北部地区的林地。2000 年后,由

于受退耕还林政策的影响,部分农田转草地的地区 ET 有所下降,东北地区林地略有波动,西部荒漠草地有所波动但变化不大,裸地区域常年植被覆盖率不高,虽有异常变化但不做讨论。

此外,基于 ET 的重点变化区域结合地级市行政

区划图来看,未来水资源配给工程规划与土地开发过程中需要重点关注的区域包括巴彦淖尔南部、乌海市大部分、鄂尔多斯西部、呼和浩特中部、包头市南部、乌兰察布北部、锡林郭勒盟北部、赤峰和通辽大部分地区以及呼伦贝尔草原。

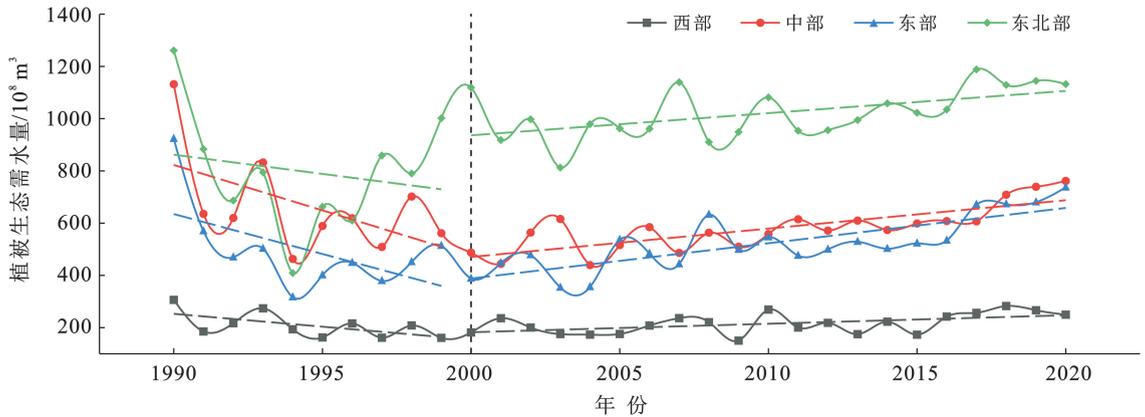


图 6 1990—2020 年内蒙古自治区典型地带性 EWR 变化

Fig.6 Typical zonal EWR changes in Inner Mongolia Autonomous Region during 1990—2020

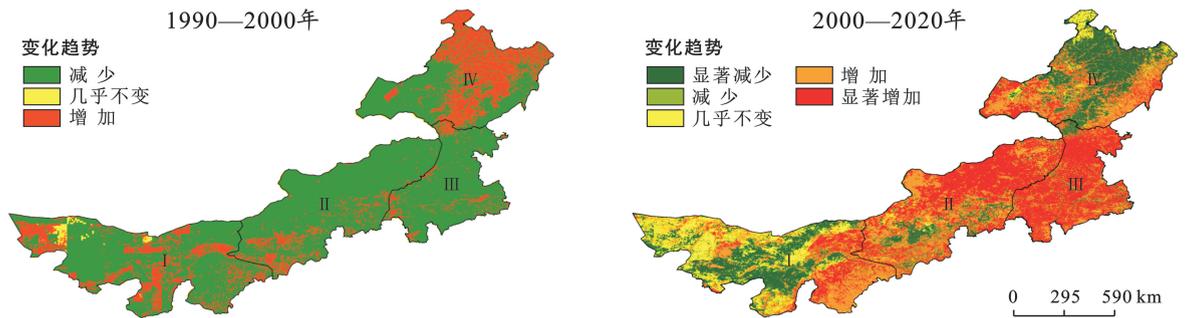


图 7 内蒙古自治区植被生态需水量 Mann-Kendal 趋势分析

Fig.7 Mann-kendal trend analysis of ecological water demand requirement of vegetation in Inner Mongolia Autonomous Region

3.4 植被生态需水量时空变化的影响因素

已有的研究表明,不同地区植被生态需水量变化的主导因素略有差异,通常包括作物系数与植被类型^[38]、土壤含水量^[39]以及气候条件^[40]。为探究本研究区生态需水量变化的主导因素,本文从模型角度出发,进行各因子与 ET 相关系数的计算,并进行熵权分析^[41](图 8)。结果表明,ET₀ 与 ET 的相关性较低,且显著性较差($R = -0.34$, $p = 0.13$); ET 与 K_s ($R = 0.44$, $p < 0.05$), K_c ($R = 0.66$, $p < 0.05$)均显著相关,但由于 K_s 存在上限,所以其与 ET 的相关性要弱于 K_c ;综合考虑 $K_c \times K_s$ 的影响,相关性进一步提高($R = 0.72$, $p < 0.05$)。从熵权角度看,ET₀ 的熵权较小,平均权重不足 0.2。而 K_c 和 K_s 总体处于主导地位, K_c 权重最大可达 0.6。可见,促使 EWR 变化的主导因素是 K_c 和 K_s ,其中, K_c 反映植被类型、覆盖度、生长阶段等, K_s 对应土壤含水量、土壤类型等,

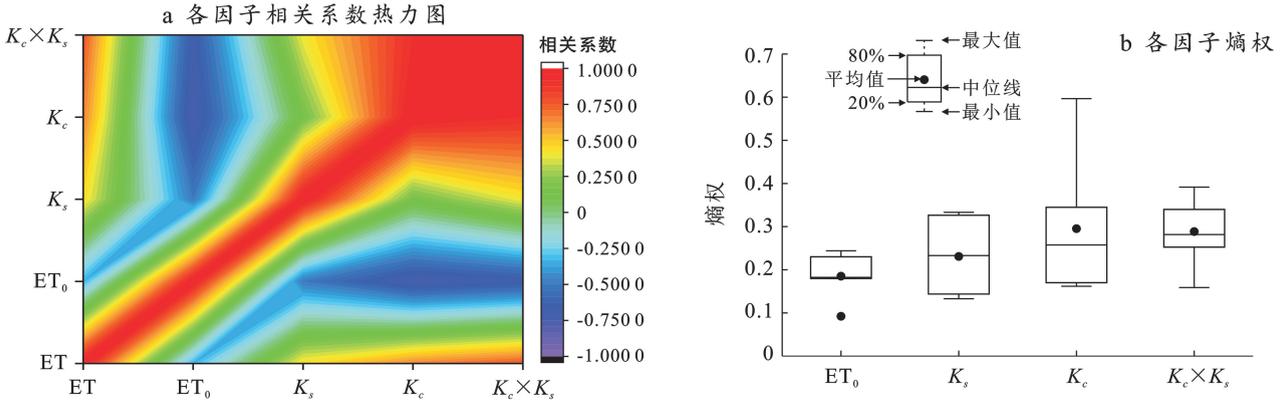
而 $K_c \times K_s$ 则反映不同气候条件下不同植被的生长情况。在内蒙古自治区中,主导植被 EWR 变化的因素与前人结果略有不同,这是由于研究区横跨中国北方湿润半湿润和干旱半干旱地区,气候条件和地表覆盖类型差异巨大,研究区植被 EWR 的时空分布是气候条件、植被因子和土壤水分共同作用的结果。因此,以地表覆盖类型变化为主要影响因素,气候因素为次要影响因素。具体来讲,决定研究区植被 EWR 的关键因素是:以地表覆盖类型变化为主的人为因素和以蒸发降水为主的气候因素,且人为因素的影响程度高于自然因素。

3.5 气候条件变化的影响

蒸发降水主导下的气候条件变化通过影响区域内土壤含水量来制约植被生态需水量的大小,而土壤含水量低于土地凋萎系数时,植被生态需水量降为 0,植被出现大面积死亡的现象,基本土地覆盖类型

变化 K_c 。出现波动,最终导致 ET 出现大幅度变化。本文使用 Penman-Monteith 公式反演潜在蒸发量,充分考虑了温度、湿度、气压、风速等气候条件,计算得到的 ET_0 。涵盖了除降水外的其他气候因子的影响^[42]。这些气候因子通过影响 ET_0 间接影响生态需水量。已有的研究表明,相对湿度^[43]、风速与日照时数^[44]、太阳辐射等^[45]都可能起到主导因素的

作用,而受制于研究区域不同,主导因素并不完全一致,本文使用相关系数法进行分析(图 9),结果显示最敏感的是太阳辐射因子($R=0.89, p<0.05$),其次是温度($R=0.82, p<0.05$)、水汽压($R=0.88, p<0.05$)、相对湿度($R=-0.49, p<0.05$)等。与此相反,太阳辐射等与 ET 呈现负相关,相对湿度则呈现正相关。



注:ET 为单位面积植被生态需水量; K_c 为作物系数; K_s 为土壤水分限制系数; ET_0 为潜在蒸发量。

图 8 内蒙古自治区植被生态需水量关键因子间相关系数热力图(a)及各因子熵权(b)

Fig.8 Thermal diagram of correlation coefficients (a), entropy weights (b) of key factors affecting ecological water demand requirement of vegetation in Inner Mongolia Autonomous Region

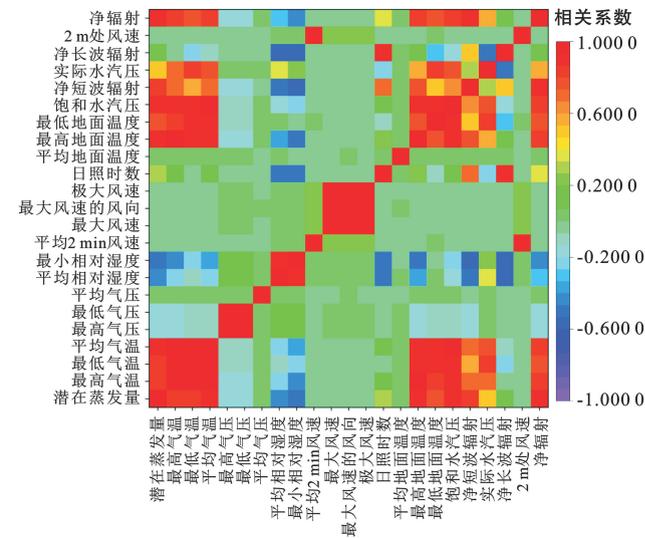


图 9 内蒙古自治区各气候因子相关系数热力图

Fig.9 Thermal diagram of correlation coefficient of various climate factors in Inner Mongolia Autonomous Region

依据辐射、温度等气候因子,计算得出了内蒙古自治区 ET_0 。其与白美兰^[46]、代海燕等^[47]的研究相吻合, ET_0 与 ET 的相关性较低,但其与 K_s ($R=-0.5, p<0.05$)和 K_c ($R=-0.75, p<0.05$)的相关性较高。也就是说,随着蒸发量的增加,土壤含水量和植被覆盖度随之下降,甚至植被类型也发生了根本变化,进而导致了 K_c 和 K_s 的变化。从熵权的角度看, K_c 和

K_s 的权重明显高于 ET_0 ,这导致 ET_0 的变化趋势与蒸发呈负相关。从蒸发量的空间分布来看,在 ET_0 普遍高于 1 200 mm 的西部地区,土壤表层几乎没有可供植被吸收的水分, ET 极低;相反,东部湿润区的地区, ET_0 较小,土壤可以提供足够的水分, ET 较高。从降水角度看(图 10),降水量与区域植被 EWR 呈明显的正相关($R=0.75, p<0.05$)。从时间上看,1990—2000 年,400 mm 降水线向东北移动,EWR 也在明显下降;2000 年后,400 mm 降水线逐渐西移,中西部地区的 EWR 显著上升。空间上的变化更为明显,随着空间位置的东移降水的增加 EWR 也随之增加,如东北部林区降水量常年高于 400 mm,成为研究区 ET 的极值区。降水的作用机理与 ET_0 相似,但其效果明显强于 ET_0 ,这是由于降水不直接参与模型,而是通过 K_s 和 K_c 的增加来正向增强 $ET(K_c \times K_s; R=0.77, p<0.05)$ 。在 30 a 的变化过程中,EWR 不会因为某一年的降水和蒸发的突然变化而产生大的波动,显示出一定的阻抗性。这是由于地表覆盖类型和植被覆盖度的变化为一长期缓慢过程,受多年大趋势影响,单年蒸发、降水的变化不会引起 EWR 的剧烈波动。值得一提的是,由于降水的时空分布具有很大的不确定性,土壤水分在年内会出现波动(如果出现极端降水,这种波动的强度会被放大),其对整个研究区的 EWR 影响不大,但会形成局部极端值。

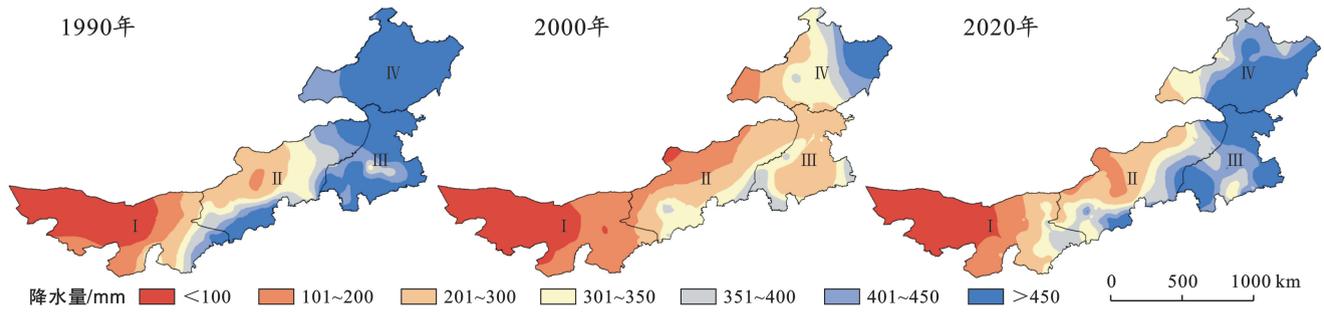


图 10 1990—2020 年内蒙古自治区年降水量变化

Fig.10 Annual precipitation change in Inner Mongolia Autonomous Region during 1990—2020

3.6 土地覆盖类型变化的影响

土地覆盖类型变迁带来的直接变化是区域内优势植被的更替,而不同类型的植被生态需水量差距较大^[48],大体趋势为:乔木>灌木、农作物>草本植物,通常乔木的生态需水量是草本植物的1.3倍以上^[49],且同一地表覆盖类型下不同植被覆盖度生态需水量也有差距^[50],一般草甸草地生态需水量是荒漠草地的2~4倍,因此基本地表覆盖类型的变化是植被生态需水量变化的重要驱动力,内蒙古自治区以草地、林地、耕地、裸地为主,4种地表覆盖类型的转化及其植被覆盖度的波动主导着各个典型分区植被生态需水量变化,结合图5,7,11来看具体表现为:①西部地区,裸地比例呈现出了先升后降的趋势,这与植被生态需水量的变化相吻合;耕地植被生态需水量有所升高,原因在于北方积温的升高,更适合农作物生长,耕地变多而草地面积持续减少^[51],同时西部地区由于常年少雨,耕地主要依靠灌溉,在灌溉及时的情况下蒸发量的上升在一定程度上也会导致植被生态需水量的提升。②中部地区,在1990—2000年草地减少而耕地增多,导致部分区域植被生态需水量提升,但由于过度放牧等行为的存在,大面积草地的植被覆盖度下降甚至土地退化,如锡林郭勒盟的中部植被覆盖度大幅下降、西北部出现了大块的裸地;但2000年以后随着退耕还林还草以及合理轮牧政策的实施,草地植被覆盖度开始回升,且大面积裸地逐渐减少,植被生态需水量也随之升高,相应由耕地转变为草地的区域生态需水量呈现下降的趋势。③东部地区,1990—2000年出现了大面积耕地转为草地的现象,虽然区域内存在耕地与草地生态需水量接近的区域,但绝大部分地区耕地的生态需水量还是要高于草地的,同时林地面积的减少也会导致植被生态需水量的降低;2000年以后,则表现出耕地增加而草地减少的趋势,生态需水量也随之增加。④东北部地区:1990—2000年由于普遍存在乱砍滥伐、过度放牧

等现象,导致了林地面积的减少与草地植被覆盖率大幅下降,部分地区甚至转变为裸地,同时也是区域内植被生态需水量下降的根本原因;2000年以后,东北部地区的草原植被生态需水量开始出现明显回升,这得益于退耕还林、合理轮牧政策的实施减少了裸地,并增加了林地和草地的面积,同时原有草地得到恢复,植被覆盖率明显提高,植被生态需水量也随之提升。

重大自然灾害引起了地表覆盖类型的根本变化也会造成生态需水量的变化,如1987年大兴安岭地区爆发的大型火灾,当地生态环境受到了极大的影响,根据张玉红等的研究^[52],1987年以后大兴安岭地区一直处在恢复状态下,植被生产力在2009年左右恢复到最大值,而后略有下降。相应的1990—2000年这个区域的ET呈现上升的趋势,2000—2020年表现出有所下降的趋势。

人口密度、GDP等都在一定程度上影响着土地覆盖类型的变化^[53](如图12所示)。人口密度与ET具有显著的正相关性($R=0.46, p<0.05$),具体表现为中部地区与东部地区人口密度较高的赤峰市、通辽市、呼和浩特市受生活需求政策引导等影响,耕地、人造林地较多,这些城市ET较高;而中西部地区人口密度相对较低的阿拉善盟、锡林郭勒盟,以裸地、荒漠草地、典型草地为主,ET低且比较均衡。GDP高的地区(如包头市、鄂尔多斯市)存在部分ET较高的区域,原因在于城市的发展过程中对于景观林地的需求增加。但相对于人口因素来说,GDP受支柱产业影响较大,如包头市、呼和浩特市等工业及服务业发达,拉高了GDP总量,因此其与生态需水量的相关性并不明显($R=0.02, p=0.914$)。除此之外,土壤类型也在一定程度影响ET的空间变化^[54],研究区内自东向西表现为:灰色森林土→黑钙土→栗钙土→棕钙土→灰漠土→灰棕漠土的水平带谱^[55],越往西土壤保水效果越差,ET越低。

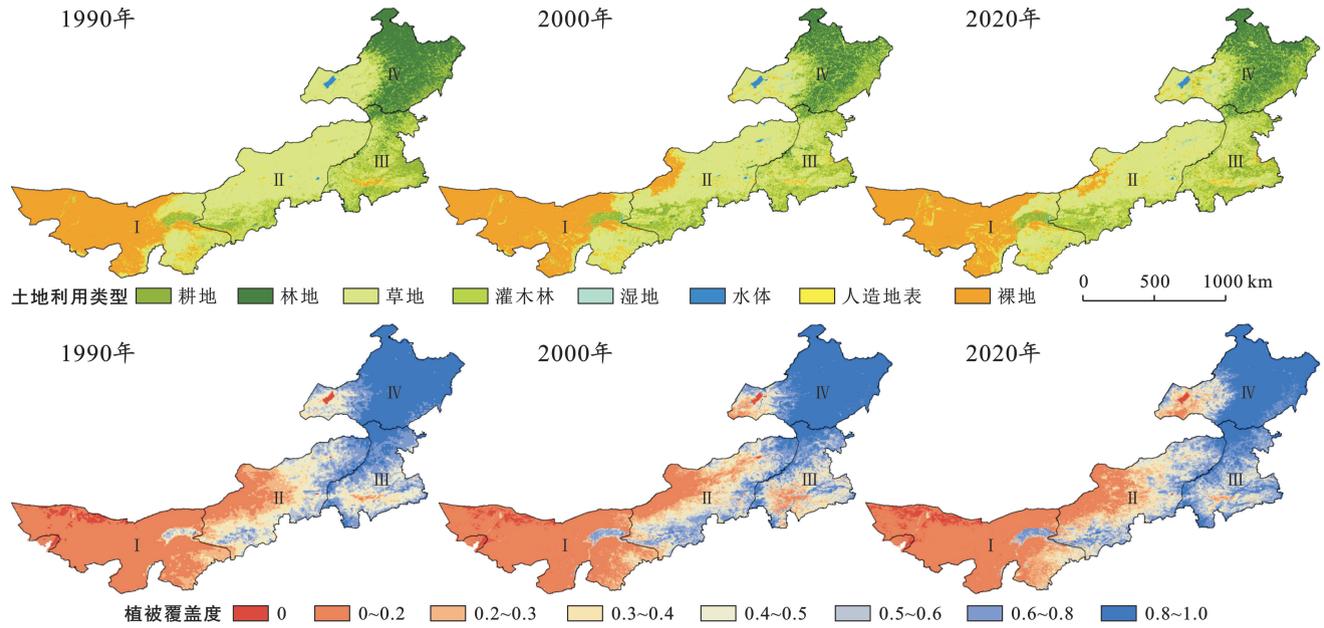


图 11 1990—2020 年内蒙古自治区土地覆盖类型的变化和部分植被覆盖率

Fig.11 Change of land cover types and Fractional vegetation cover in Inner Mongolia Autonomous Region during 1990—2020

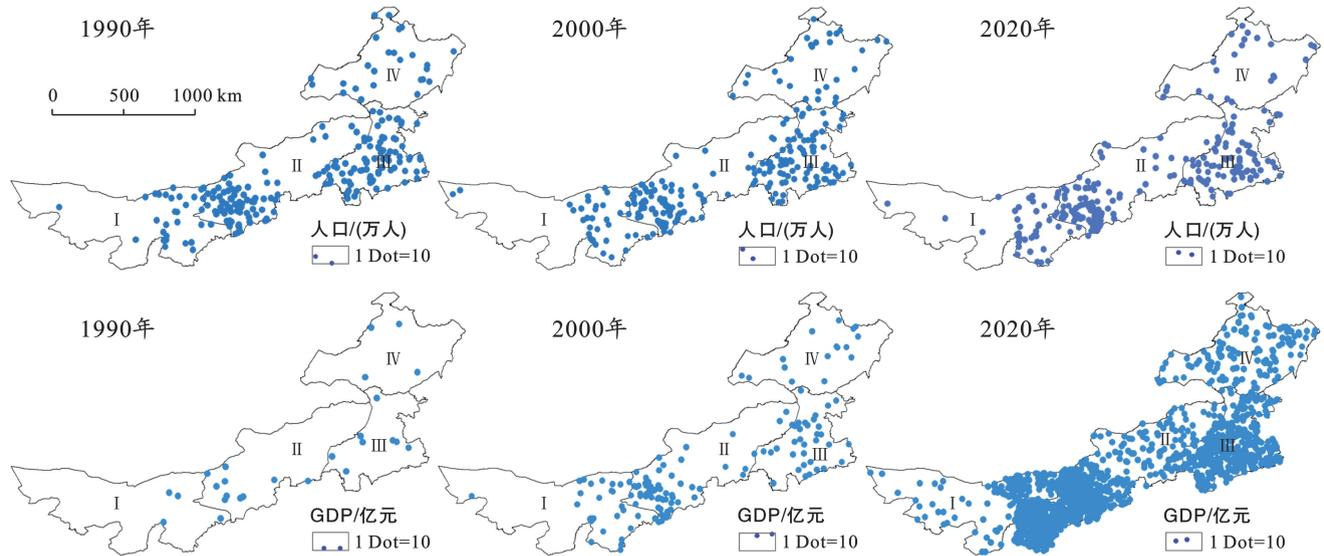


图 12 1990—2020 年内蒙古自治区人口密度和 GDP 密度

Fig.12 Population density, and GDP density in Inner Mongolia Autonomous Region during 1990—2020

结合降水与植被生态需水量结果来看,主要的缺水区域集中在降水较少但 ET 较高的中西部地区的耕地与人造林地,在这些区域需要提前规划引水灌溉工程,补给缺水额度。

在内蒙古自治区这类自然林草资源丰富但降水少而不均的地区,植树造林与耕地的开发需要结合典型分区内基本土地覆盖类型下的 ET(图 13)。例如,在西部地区仅有少数靠近水源或降水较多的区域适宜进行土地开发与植树造林工作,其他地区在无法进行其他水源补给情况下进行这些工作很容易造成土地资源浪费或土地退化的情况,结合图 13 可知,如果在西部地区某地将草地或裸地改为林地,则在前期

植被根系发育不足无法获取足量地下水维持生存时,改种区域每单位面积需要补充 100 mm 以上的水量,考虑到西部地区极少的降水,这个额度里面绝大部分需要通过其他途径补给,规划工程时要做好这方面的预算。内蒙古自治区拥有大量天然草地,部分区域的草地 ET 与降水基本接近,在这部分地区要严格控制放牧强度,实行合理轮牧给草地以恢复的时间,有条件尽量将放牧区域规划在降水较多的区域或时间段。对于东北部地区的林地区域则重点考虑开发降水较多的区域,对于降水等水源补给较少的区域则要进行重点的保护工作,保证人与自然的和谐可持续发展。

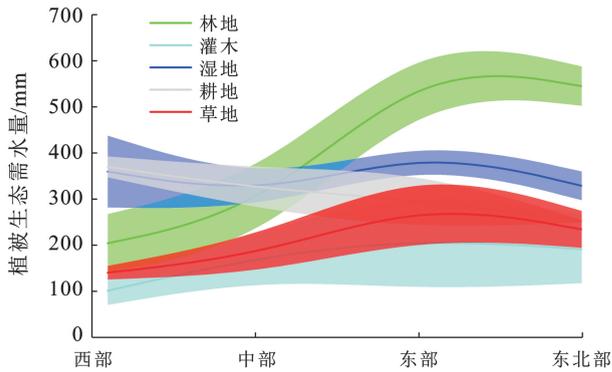


图 13 各典型区域不同土地利用类型下植被生态需水量

Fig.13 Ecological water requirement of vegetation under different land use types in each typical region

4 结论

本研究基于遥感数据构建了适用于大尺度上的内蒙古自治区土壤含水量模型,解决了土壤含水量数据时空序列缺失的问题,结合土地覆盖类型数据和气象数据,估算了各地表覆盖类型下的优势植被的作物系数,并在 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 的基础上,得到了内蒙古自治区 1990—2020 年植被生态需水量的完整图景。土地覆盖类型的变化是内蒙古自治区植被生态需水量时空变化的重要驱动力,以降水、蒸发和太阳辐射为主的气候条件也发挥了重要作用。研究结果不仅为大尺度、长时间序列的植被生态需水量反演提供了参考,也为不同土地覆被类型下植被生态需水量的准确估算提供技术支持。

[参 考 文 献]

- [1] 李强坤,丁宪宝,胡亚伟,等.基于生态功能考虑的西北干旱地区生态需水研究[J].环境科学与管理,2007,32(9):145-148.
- [2] Cai Ximing, 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):W4S-W8S.
- [3] 杨志,王德全.基于生态需水量模型的盐池内陆河流域合理植被面积研究[J].中国水土保持,2011(12):46-48.
- [4] Deng Xiaoya, Xu Hailiang, Ye Mao, et al. Impact of long-term zero-flow and ecological water conveyance on the radial increment of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China [J]. Regional Environmental Change, 2015,15(1):13-23.
- [5] 张丽,李丽娟,梁丽乔,等.流域生态需水的理论及计算研究进展[J].农业工程学报,2008,24(7):307-312.
- [6] 胡广录,赵文智.干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J].生态学报,2008,28(12):6282-6291.
- [7] Song Xinyi, Lu Fan, Xiao Weihua, et al. Performance of 12 reference evapotranspiration estimation methods compared with the Penman-Monteith method and the potential influences in Northeast China [J]. Meteorological Applications, 2019,26(1):83-96.
- [8] Wang Gailing, Wang Qingchu, Shi Shengxin. Vegetation's ecological water requirement in Yongding River watershed in Shanxi Province [J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(10):1743-1753.
- [9] 畅利毛,郭克贞,魏占民,等.干旱荒漠草原应用 Penman-Monteith 与 Penman 修正式计算 ET_0 的偏差分析[J].灌溉排水学报,2007,26(1):55-58.
- [10] Zhang Yu, Yang Shengtian, Ouyang Wei, et al. Applying multi-source remote sensing data on estimating ecological water requirement of grassland in ungauged region [J]. Procedia Environmental Sciences, 2010,2:953-963.
- [11] 宋孝玉,刘雨,覃琳,等.内蒙古鄂托克旗天然草地植被生态需水量研究[J].农业工程学报,2021,37(3):107-115.
- [12] Zhang Zhen, Zhang Panyue, Zhang Guangming. Study on ecological water requirement of vegetation in Wuhai based on GIS [J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021,621(1):012132.
- [13] Xie Pinlei, Chen Yulin, Chang Shucheng, et al. Analysis of the environmental degradation and ecological water requirement process of the typical wetlands in Northeast China [J]. Advanced Materials Research, 2014,1014:299-302.
- [14] 郭克贞,史海滨,苏佩凤,等.锡林郭勒草原生态需水初步研究[J].中国农村水利水电,2004(8):82-85.
- [15] 周丹,沈彦俊,陈亚宁,等.西北干旱区荒漠植被生态需水量估算[J].生态学杂志,2015,34(3):670-680.
- [16] Chi Dengkai, Wang Hong, Li Xiaobing, et al. Estimation of the ecological water requirement for natural vegetation in the Ergune River basin in Northeastern China from 2001 to 2014 [J]. Ecological Indicators, 2018,92(S):141-150.
- [17] 赵春权,王燕.实用型智能化滴灌系统的研究与应用[J].农业技术与装备,2013,31(2):127-136.
- [18] 刘海新.内蒙古草地生产力时空分析及产草量遥感估算和预测[D].山东 青岛:山东科技大学,2019.
- [19] Chen Yongzhe, Feng Xiaoming, Fu Bojie. An improved global remote-sensing-based surface soil moisture (RSSSM) dataset covering 2003—2018 [J]. Earth System Science Data, 2021,13(1):1-31.
- [20] Fischer G, Nachtergaele F, Prieler S, et al. Global Agro-ecological Zones Assessment for Agriculture (GAEZ 2008) [J]. IIASA, Laxenburg, Austria and FAO,

- Rome, Italy, 2008.
- [21] 高以信,李锦.1:400 万中国土壤图(2000)[M].北京:地图出版社,2000.
- [22] 地球系统科学数据共享网.1:400 万中国土壤图(2000)[M].北京:地图出版社,2006.
- [23] 刘良云,张肖.1990 年全球 30 m 地表覆盖精细分类产品 V1.0 [DS].2021-08-02,.
- [24] Yang Jie, Huang Xin. The 30 m annual land cover dataset and its dynamics in China from 1990 to 2019 [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13 (8): 3907-3925.
- [25] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements; FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [J]. FAO, Rome, 1998,300(9):D05109.
- [26] Shahid S. Impact of climate change on irrigation water demand of dry season Boro rice in Northwest Bangladesh [J]. *Climatic Change*, 2011,105(3):433-453.
- [27] Fu Yicheng, Leng Jiwei, Zhao Jinyong, et al. Quantitative calculation and optimized applications of ecological flow based on nature-based solutions [J]. *Journal of Hydrology*, 2021,598:126216.
- [28] Xu Zhongqi, Zhang Naixuan, Wang Ran, et al. The ecological water demand of different vegetation types in the Bashang Area, Northwest Hebei Province [J]. *Journal of Resources and Ecology*, 2022, 13 (1): 113-119.
- [29] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79 (2/3): 213-224.
- [30] Price J C. On the analysis of thermal infrared imagery: the limited utility of apparent thermal inertia [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985,18(1):59-73.
- [31] 赵英时.遥感应用分析原理与方法[M].北京:科学出版社,2013.
- [32] Idso S, Jackson R, Pinter J P, et al. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability [J]. *Agricultural Meteorology*, 1981,24:45-55.
- [33] 阮丽华,朱灿阳.基于熵权法的湖北省土地利用时空特征及综合评价[J].*湖北农业科学*, 2019, 58 (16): 145-151.
- [34] 毕彦杰,赵晶,赵勇,等.京津冀地区潜在蒸散量时空演变特征及归因分析[J].*农业工程学报*, 2020, 36 (5): 130-140.
- [35] Li Qin Hai, Meng Xiangbao, Liu Yuben, et al. Risk assessment of floor water inrush using entropy weight and variation coefficient model [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2019,37(3):1493-1501.
- [36] Smith L C. Trends in Russian Arctic river-ice formation and breakup, 1917 to 1994 [J]. *Physical Geography*, 2000,21(1):46-56.
- [37] Zoungrana B J, Conrad C, Thiel M, et al. MODIS NDVI trends and fractional land cover change for improved assessments of vegetation degradation in Burkina Faso, West Africa [J]. *Journal of Arid Environments*, 2018,153:66-75.
- [38] Liu Yujie, Chen J, Pan Tao. Analysis of changes in reference evapotranspiration, pan evaporation, and actual evapotranspiration and their influencing factors in the North China Plain during 1998—2005 [J]. *Earth and Space Science*, 2019,6(8):1366-1377.
- [39] 李曼,王妞妞,刘焕才.疏勒河中下游地区植被生态需水量时空变化研究[J].*人民黄河*, 2021,43(11):97-102.
- [40] Liu Mingliang, Tian Hanqin, Lu Chaoqun, et al. Effects of multiple environment stresses on evapotranspiration and runoff over eastern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2012,426:39-54.
- [41] Cui Yi, Feng Ping, Jin Juliang, et al. Water resources carrying capacity evaluation and diagnosis based on set pair analysis and improved the entropy weight method [J]. *Entropy*, 2018,20(5):359-378.
- [42] 安彬,肖薇薇.1955—2015 年陕西省潜在蒸散量时空变化特征及成因[J].*水土保持研究*, 2018,25(4):146-151.
- [43] Zhang Qiang, Xu Chongyu, Chen Xiaohong. Reference evapotranspiration changes in China: natural processes or human influences? [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011,103(3):479-488.
- [44] Ye Xuchun, Li Xianghu, Liu Jian, et al. Variation of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in the Poyang Lake catchment, China [J]. *Hydrological Processes*, 2014,28(25):6151-6162.
- [45] Zhao Lingling, Xia Jun, Sobkowiak L, et al. Climatic characteristics of reference evapotranspiration in the Hai River Basin and their attribution [J]. *Water*, 2014,6(6):1482-1499.
- [46] 白美兰,郝润全,侯琼,等.内蒙古典型草原区地表干湿状况变化趋势及影响因素分析[J].*中国农业气象*, 2011,32(2):208-213.
- [47] 代海燕,李丹,娜日苏,等.内蒙古干湿环境演变与地区生态建设优势气候背景分析[J].*干旱区地理*, 2019,42 (4):745-752.
- [48] Zhao Fenli, Li Hui, Li Chunhui, et al. Analyzing the influence of landscape pattern change on ecological water requirements in an arid/semiarid region of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2019,578:124098.

- [12] 张洋,李鹏,马文东,等.黄河上游西柳沟流域土壤侵蚀对土地利用变化响应[J].水土保持研究,2022,29(5):70-76,84.
- [13] 王普庆,侯素珍.西柳沟丘陵区土壤组成及对流域产沙的影响[J].人民黄河,2020,42(2):1-4,17.
- [14] 封扬帆,李鹏,张祎,等.西柳沟流域拦沙坝沟道冲刷减蚀能力模拟[J].水土保持学报,2022,36(5):24-31.
- [15] 刘璐,郭月峰,姚云峰,等.西柳沟流域水沙关系及变化趋势[J].江苏农业科学,2020,48(21):269-273.
- [16] Jun Chen, Ban Yifang, Li Songnian. Open access to Earth land-cover map[J]. Nature, 2014, 514(7523): 434-434.
- [17] 王文君,陈新闻,李小倩,等.十大孔兑降雨侵蚀产沙时空分布特征及预测[J].人民黄河,2019,41(4):1-7,10.
- [18] 张洪江.土壤侵蚀原理[M].北京:中国林业出版社,2006.
- [19] 许炳心.“十大孔兑”侵蚀产沙与风水两相作用及高含沙水流的关系[J].泥沙研究,2013,6(6):28-37.
- [20] 肖南,董治宝,南维鸽,等.1957—2014 年库布齐沙漠地面风场特征[J].中国沙漠,2018,38(3):1188-1195.
- [21] 靳灵娜.库布齐沙漠密集流动沙丘治理技术研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2021.
- [22] 阳辉,师长兴.黄河上游十大孔兑冲积扇泥沙运动和沉积环境研究[J].泥沙研究,2020,45(4):33-38.
- [23] 姬宝霖,吕忠义,申向东,等.内蒙古达拉特旗十大孔兑综合治理方案研究[J].人民黄河,2004,26(1):31-32,36.
- [24] Yang Hui, Shi Changxing. Spatial and temporal variations of aeolian sediment input to the tributaries (the Ten Kongduis) of the upper Yellow River [J]. Aeolian Research, 2018,30:1-10.
- [25] Zhao Hongsheng, Feng Shuang, Dang Xiaohong, et al. Aeolian sand erosion and deposition patterns in the arid region of the Xiliugou Tributary on the Upper Reaches of the Yellow River [J]. Sustainability, 2023,15(15): 1-18.
- [26] 琚振国.砒砂岩遇水失稳对公路影响试验研究[J].城市道桥与防洪,2023,37(7):224-228,26.
- [27] 王佳坤,郭月峰,祁伟,等.砒砂岩土壤水分入渗规律及适用模型研究[J].灌溉排水学报,2020,39(S1): 117-121.
- [28] 侯素珍,刘晓燕,万小刚,等.西柳沟暴雨洪水输沙分析[J].泥沙研究,2020,45(6):53-58.
- [29] 李海光,李鹏,孟庆东,等.鄂尔多斯市水土保持公报[R].内蒙古 鄂尔多斯:鄂尔多斯市水利局,2020.
- [30] 鄂尔多斯市人民政府.“拦沙换水”试点工程取得突破性进展[EB/OL].(2016-05-30)[2023-10-13]. http://www.ordos.gov.cn/gk_128120/zdjsxm/201605/t20160530_2507099.html.
- [31] 祖强.极端降雨条件下小流域淤地坝系级联溃决风险分析[D].陕西 西安:西安理工大学,2022.
- [32] 秦富仓,杨振奇,李龙.砒砂岩区土壤侵蚀机理与生态修复技术研究进展[J].北京林业大学学报,2020,42(12): 142-150.
- [33] 姚文艺,吴智仁,刘慧,等.黄河流域砒砂岩区抗蚀促生技术试验研究[J].人民黄河,2015,37(1):6-10.
- [34] 惠波,李斌斌,惠露,等.鄂尔多斯水土保持“拦沙换水”生态补偿模式浅析[J].中国水土保持,2019(6):16-18.
- [35] 周丽艳,崔振华,廖晓芳.黄河上游西柳沟流域水土保持治理及水沙置换初步探讨[J].泥沙研究,2012,37(1): 63-67.
- [36] 张慧玲.综治“十大孔兑”实现拦沙入黄[N].内蒙古日报(汉),2023-07-20(9).

(上接第 335 页)

- [49] 范亚云,郭玉川,卢刚,等.艾比湖流域植被生态需水量[J].中国沙漠,2018,38(4):865-871.
- [50] 周洪华,郝兴明,李卫红.孔雀河流域天然植被生态需水量估算[J].环境与可持续发展,2017,42(2):140-144.
- [51] 贾静.近 20 年内蒙古土地利用/覆盖变化及其生态系统服务价值估算[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古师范大学,2012.
- [52] 张玉红,闫浩.森林火灾后植被恢复的遥感监测[J].自然灾害学报,2022,31(2):127-136.
- [53] Fan Zemeng. Simulation of land-cover change in Jing-Jin-Ji region under different scenarios of SSP-RCP [J]. Journal of Geographical Sciences, 2022,32(3):421-440.
- [54] 王改玲,王青杵,石生新.山西省永定河流域林草植被生态需水研究[J].自然资源学报,2013,28(10):1743-1753.
- [55] 云文丽,侯琼,李友文,等.内蒙古地区土壤水文特征的空间分布[J].干旱区资源与环境,2013,27(2): 193-197.