

黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集 (1980–2015)

王亚琴^{1,2,3}, 孙 林¹, 李洪宇^{1,3}, 罗 毅^{1,3,*}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
2. 中国国土勘测规划院, 北京 100035;
3. 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要: 气候状况是关系黄河生态保护和高质量发展国家重大战略的重要因素。基于中国地面气候资料日值数据集, 选取黄河流域上中游地区及其周边 195 个气象站点 1980–2015 年逐月平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、20–20 时降水量、日照时数观测数据, 以及运用彭曼法计算得到的潜在蒸散发量, 在 ANUSPLIN 软件平台上, 综合考虑地形地貌对气温、风速和湿度空间分异规律的影响, 辐射、湿度、风速等因子对潜在蒸散发量的影响, 分别构建不同变量的薄盘光滑样条函数, 研发了黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集 (1980–2015)。该数据集包括: (1) 黄河流域中上游边界数据; (2) 1980–2015 年逐月平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、20–20 时降水量、日照时数和潜在蒸散发量 8 km 分辨率月度网格数据。数据集存储为.shp 和.img 格式, 一共包含 3,463 个文件 672 MB (压缩为 1 个文件, 138 MB)。

关键词: 黄河流域; 气象资料; 气候变化; 空间插值

DOI: <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.01.04>

CSTR: <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.14.2022.01.04>

数据可用性声明:

本文关联实体数据集已在《全球变化数据仓储电子杂志 (中英文)》出版, 可获取:

<https://doi.org/10.3974/geodb.2021.07.09.V1> 或 <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.07.09.V1>.

1 前言

黄河流域由西向东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和华北平原四个地貌单元, 覆盖九省区, 是我国北方地区重要生态屏障和经济地带, 对我国生态安全和经济社会高质量发展具有重要作用。黄河流域绝大部分地区地处我国干旱半干旱地区, 属大陆性气候^[1], 水资源问题突出, 严重制约着黄河流域生态保护和高质量发展^[2–4]。气候变化是影响水文过

收稿日期: 2021-07-29; 修订日期: 2021-09-13; 出版日期: 2022-03-25

基金项目: 中华人民共和国科学技术部 (2016YFC0501603); 中国科学院 (XDA20060301)

*通讯作者: 罗毅, 中国科学院地理科学与资源研究所, 中国科学院大学, luoyi@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 王亚琴, 孙林, 李洪宇等. 黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集 (1980–2015) [J]. 全球变化数据学报, 2022, 6(1): 25–36. <https://doi.org/10.3974/geodp.2022.01.04>.
[2] 王亚琴, 孙林, 李洪宇等. 黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集 (1980–2015) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.07.09.V1>.
<https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.07.09.V1>.

程的主要因素,对黄河流域水资源的空间分布、利用格局和安全存在密切关系^[2]。同时,上世纪80年代,为了提高我国森林覆盖率,实施全民义务植树运动;2000年黄河中上游地区开始实施退耕还林还草试点工作。经过近40年的不懈努力,黄河流域植被明显改善^[5]。但是,随之而来的是水资源问题进一步加剧,表现为生态需水增加、蒸散发量增加、产流减少、水少沙多、水沙异源、土壤干层化、下游水资源短缺等特点^[6-11]。因此,在扎实推进和贯彻落实习近平总书记在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提出的黄河流域生态保护和高质量发展的重大国家战略目标下,明确黄河流域气候状况,在有限的水资源基础上,通过采取有力的生态修复保护及自然资源管理应对措施,是践行“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”指示批示精神的重要之举。

理论上,获取准确的气象信息空间分布数据应由高密度站网采集,而目前由于经济、技术、地形等原因,气象台站是有限的,且分布不均匀、密度不足^[12]。通常,定点观测的气象站点难以直接用于其他无观测资料地区。这些地区只能由其毗邻的气象台站观测数据,经过一定的数学模型进行估算,即气象数据的空间插值^[13]。空间插值的实质是将已知气象观测离散数据,通过一定的数学表达式推知其他未知点的过程。目前常用的空间插值方法可分为确定性插值和地统计插值两种^[14]。确定性插值主要包括,多项式插值法(Interpolating Polynomials Methods)、趋势面法(Trend Surface Method)、反距离权重法(Inverse distance weighted);基于地统计学的插值方法包括,克里金法(Kriging Methods)和样条法(Spline Methods)。前者基于已知气象台站的空间分布规律通过数学函数来拟合表面,后者主要通过统计和数学的方法,不仅可以拟合表面,还可以量化误差^[15]。针对不同的气象因子和地区,各插值方法各有优劣。近年来,基于样条函数法的插值软件ANUSPLIN在国内外得到了广泛应用,且插值精度较高^[16-18]。ANUSPLIN是由澳大利亚科学家Hutchinson基于薄盘样条理论开发的气象数据专用插值软件,允许引入多个协变量子模型,处理二维至多维的样条,进行多个表面的空间插值,适合做时间序列气象数据的插值^[19]。因此,本文基于1980-2015年以来的黄河流域的气象台站观测数据,通过插值得到8-km分辨率月度网格气象数据集,在此基础上分析黄河流域36年来气候变化情况,以为黄河流域生态保护和高质量发展提供科学依据。

2 数据集元数据简介

《黄河流域上中游地区月度8-km网格气象数据集(1980-2015)》^[20]的名称、作者、地理区域、数据格式出版及共享服务平台及共享政策等信息详见表1。

3 数据研发方法

3.1 数据来源

本数据集中所采用的气象站点数据产品为国家气象科学数据中心¹共享的中国地面气候资料日值数据集,该数据集主要来源于全国基本、基准气象观测站及自动站。本数据集采用黄河流域周边共计195个气象站点数据,按月汇总整理形成1980-2015年的月尺度格

¹ 国家气象科学数据中心-中国气象数据网门户网站[OL]. <http://data.cma.cn/>.

点数据，采用的主要观测要素包括平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、20–20 时降水量、平均风速、日照时数和蒸发皿蒸发。黄河流域中上游边界采用 SRTM 90-m 分辨

表 1 《黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集（1980–2015）》元数据信息表

条目	描述
数据集名称	黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集（1980–2015）
数据集短名	MeteoDataYellowRB_1980–2015
作者信息	王亚琴，中国科学院地理科学与资源研究所，wangyq.14b@igsnrr.ac.cn 孙 林，中国科学院地理科学与资源研究所，sunlin-cas@hotmail.com 李洪宇，中国科学院地理科学与资源研究所，lihy.15b@igsnrr.ac.cn 罗 毅，中国科学院地理科学与资源研究所，luoyi@igsnrr.ac.cn
地理区域	黄河流域上中游地区
数据格式	数据年代 1980–2015 数据量 672 MB
时间分辨率	.shp、.img 逐月
空间分辨率	8 km×8 km
数据单位	平均气温、最高气温、最低气温：摄氏度（℃）；平均相对湿度：百分率（%）；平均 2 m 处风速（m/s）；20–20 时降水量：毫米（mm）；日照时数：小时（h）；潜在蒸散发量：毫米（mm）
数据集组成	（1）黄河流域中上游边界数据；（2）1980–2015 年逐月平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、20–20 时降水量、日照时数和潜在蒸散发量 8-km 分辨率月度网格数据。数据集存储为.shp 和.img 格式，一共包含 3,463 个文件 672 MB（压缩为 1 个文件，138 MB）。自 1980 年 1 月至 2015 年 12 月，每个气象因子文件下以 yyyyymm.img 形式命名，如 198001 是 1980 年 1 月的××数据
基金项目	中华人民共和国科学技术部（2016YFC0501603）；中国科学院（XDA20060301）
数据计算环境	ANUSPLIN4.3
出版及共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据集和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报（中英文）》编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[21]
数据和论文检索系统	DOI, CSTR, Crossref, DCI, CSCD, CNKI, SciEngine, WDS/ISC, GEOSS

率 DEM，利用 ARCGIS10.3 Spatial Analyst 扩展模块工具箱中的水文建模工具，根据河流、流向和出水口情况，确定黄河流域空间范围，以花园口水文站作为黄河流域中上游和下游的分界线。

3.2 研发方法

3.2.1 潜在蒸散计算方法

本数据集潜在蒸散量的计算采用 Penman-Monteith 公式（P-M 法）^[22]，该算法充分考虑了作物的生理特征、空气动力学参数，适用于计算植被覆盖下的陆面蒸散发量。P-M 法包括了辐射平衡引起的辐射项和由温度、风速和水气压差引起的空气动力学项，如下：

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} \mu_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34\mu_2)}$$

(1)

式中， ET_0 为潜在蒸散发量（mm）； Δ 为饱和水汽压与气温曲线的斜率（kPa/℃）； R_n 为地表接受的净辐射（MJ/m²）； G 为土壤热通量（MJ/m²）； e_s 、 e_a 分别为饱和水汽压和实际水汽压（kPa）； γ 为干湿常数（kPa/℃）； μ_2 为2 m处的风速（m/s）； T 为平均温度（℃）。其中 R_n 为太阳辐射量的函数，太阳辐射量一般根据日照时数采用经验公式进行估算，其表达式为：

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{S}{N} \right) R_a$$

(2)

式中， a_s 和 b_s 分别为线性经验参数，是太阳辐射量计算的主要误差来源。本数据集根据蒸发皿蒸发实测数据作为P-M法计算的潜在蒸散发的目标值，确定 a_s 和 b_s 经验参数值。该方法得到的潜在蒸散发实际上为水面蒸发，代表该地区的最大蒸发能力。由上述公式可知，潜在蒸散发计算需要输入计算地点的纬度、高程等地理因子，以及风速、最低气温、最高气温、日照时数、相对湿度、蒸发皿蒸发等气象因子。

3.2.2 空间插值方法

对各气象因子逐月数据采用表2列出的模型进行插值，其中最低温度、最高温度、平均温度、风速、相对湿度、辐射等因子以经度和纬度作为自变量，高程作为协变量插值；潜在蒸散发则以经度和纬度为自变量，辐射、相对湿度和风速作为协变量插值；降水具有随机性、不均匀性和数值范围较大的特点，插值过程中对其进行平方根转换，以经度和纬度为自变量。

表2 气象因子空间插值模型

气象因子	模型*	独立变量	独立协变量	数据转换	样条次数
月最高气温	TVPTPS	经度、纬度	高程		2、3
月最低气温	TVPTPS	经度、纬度	高程		2、3
月平均气温	TVPTPS	经度、纬度	高程		2、3
风速	TVPTPS	经度、纬度	高程		2
降水	BVTPS	经度、纬度		平方根转换	2
相对湿度	TVPTPS	经度、纬度	高程		2
日照时数	BVTPS	经度、纬度			2、3
潜在蒸散发	QVPTPS	经度、纬度	辐射、相对湿度、风速		2、3、4

*：BVTPS，双变量薄盘光滑样条函数；TVPTPS:三变量局部薄盘光滑样条函数；QVPTPS:变量局部薄盘光滑样条函数。

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

黄河流域上中游地区月度8-km网格气象数据集（1980–2015）由下列数据组成：

- (1) 1980–2015年月度最高气温网格数据；
- (2) 1980–2015年月度最低气温网格数据；
- (3) 1980–2015年月度平均气温网格数据；

- (4) 1980–2015 年月度风速网格数据;
- (5) 1980–2015 年月度 20–20 时降水量网格数据;
- (6) 1980–2015 年月度相对湿度网格数据;
- (7) 1980–2015 年月度日照时数网格数据;
- (8) 1980–2015 年月度基于 P-M 法的潜在蒸散发量网格数据。

数据集包含: (1) 黄河流域上中游边界数据; (2) 1980–2015 年逐月平均气温、最高气温、最低气温、平均相对湿度、平均风速、20–20 时降水量、日照时数和潜在蒸散发量 8-km 分辨率月度网格数据。数据集存储为.shp 和.img 格式, 一共 3,463 个文件 672 MB (压缩为 1 个文件, 138 MB), 空间范围覆盖黄河流域上中游地区, 时间分辨率为月尺度, 空间分辨率为 8 km×8 km。文件分气象因子分类存储, 命名方式为 yyyyymm.img 形式命名。

4.2 数据结果

4.2.1 黄河流域气候特征状况分析

黄河流域气候特征空间异质性明显。温度空间分布格局如图 1a、1b、1c 所示, 其中年平均气温自西向东随海拔高度下降温度呈增加趋势 (图 1c), 变化区间约为 $-11.7\sim-15.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, 年平均气温约为 $5.8\text{ }^{\circ}\text{C}$; 日照时数由东南向西北呈递减趋势 (图 1d), 年平均日照时数为 2,562 h; 相对湿度由南向北从 77.5% 递减至 42.8%, 流域平均值约为 58%; 黄河源区北部及流域内高海拔地区平均风速较大 (图 1f), 最大年均风速约为 5 m/s 左右, 流域年平均风速约为 2.5 m/s; 黄河源区潜在蒸散发量整体较小, 黄河中游地区年平均潜在蒸散发量由东南向西北逐渐递增 (图 1g), 西北部干旱地区潜在蒸散发量最大值超过 2,000 mm; 年平均降水量由东南 760 mm 逐渐递减到西北 112 mm (图 1h)。总的来说, 黄河源区气候特征表现为: (1) 温度较低、日照时数较高、风速较大、潜在蒸散发量较小; (2) 北部地区降水量较小, 相对湿度较小; (3) 南部地区降水量较大, 相对湿度也较大。黄河流域中游地区气候特征表现为: (1) 东南部气候相对湿润, 呈气温高、日照时数相对短、风速较小、降水量相对较大、潜在蒸散发量相对较小的特点; (2) 西北部气候干燥, 呈冬季气温低、夏季气温高、日照时数相对较长、风速较大、降水量小、潜在蒸散发量大的特点。

4.2.2 黄河流域气候时间变化特征

(1) 季节性变化

黄河流域气象条件具有明显的季节性变化特征。春季气温回升, 夏季 7 月份气温达到最大值约为 $18.6\text{ }^{\circ}\text{C}$, 秋季气温逐渐回落, 冬季多年平均气温低至 $-8.7\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 月份相对湿度为全年最低, 约为 48.2%, 8 月达到最大值 69.9%, 冬季相对湿度较稳定, 变化区间为 51.6%–53.4%; 日照时数春季逐渐增加, 8 月份达到最大值约为 3,332 h, 冬季日照时数相对稳定, 波动较小; 4 月风速为最大值, 约为 3 m/s; 夏季降水明显, 7 月流域平均降水量达 87.5 mm, 冬季降水相对较少, 总降水量仅为 10.3 mm; 4–6 月潜在蒸散发量相对较大, 约为 504.8 mm, 最大值发生在 5 月, 约为 180.6 mm, 冬季潜在蒸散发量较小, 约为 129.1 mm。总的来说, 黄河流域气象条件的季节性特征呈现如下特点: 1) 春季日照时数增加, 气温回升, 降水小幅增加, 风速增加, 空气相对湿度小幅下降, 潜在蒸散发量增加且达到全年最

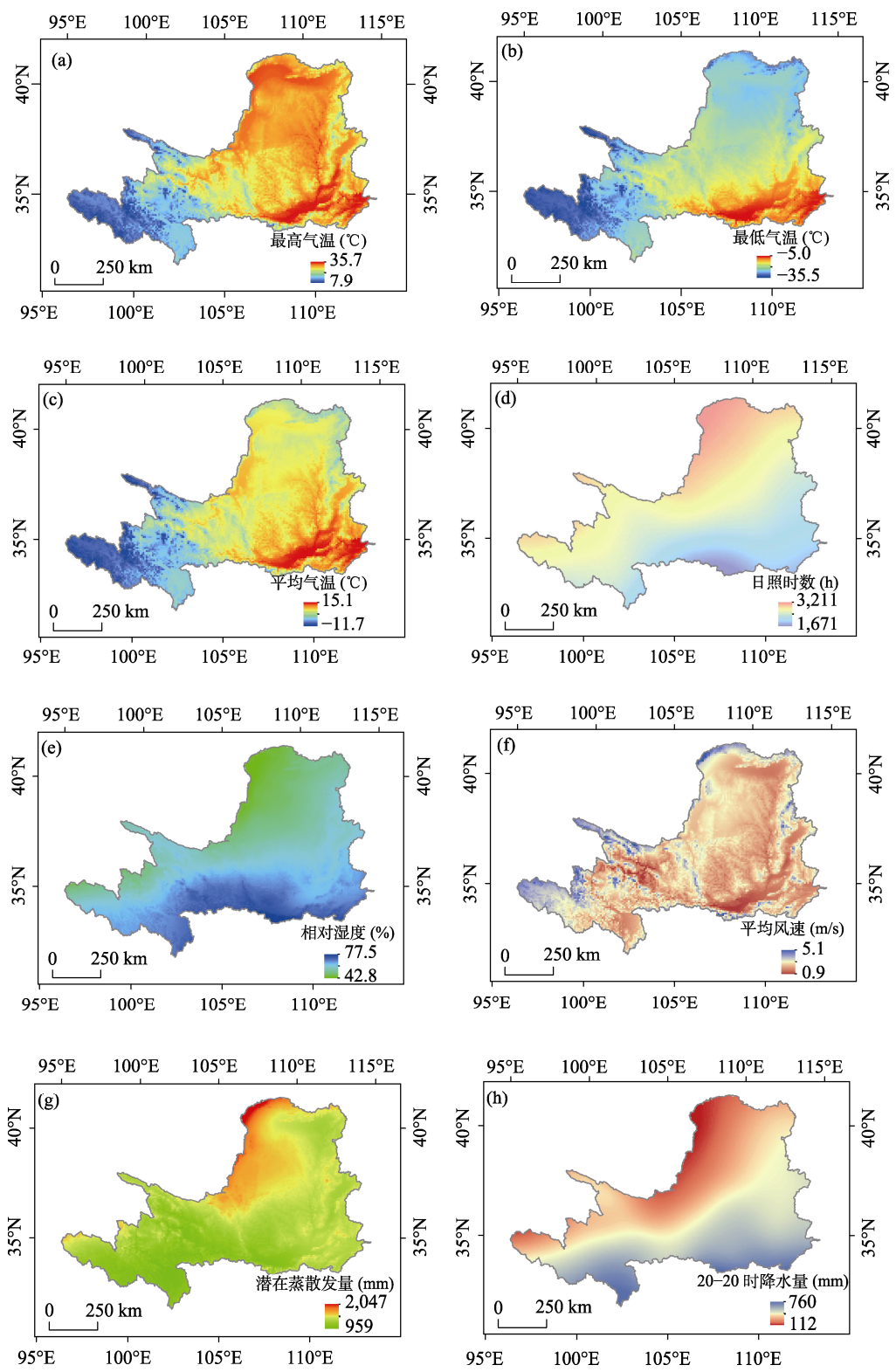


图 1 黄河流域气象因子空间格局

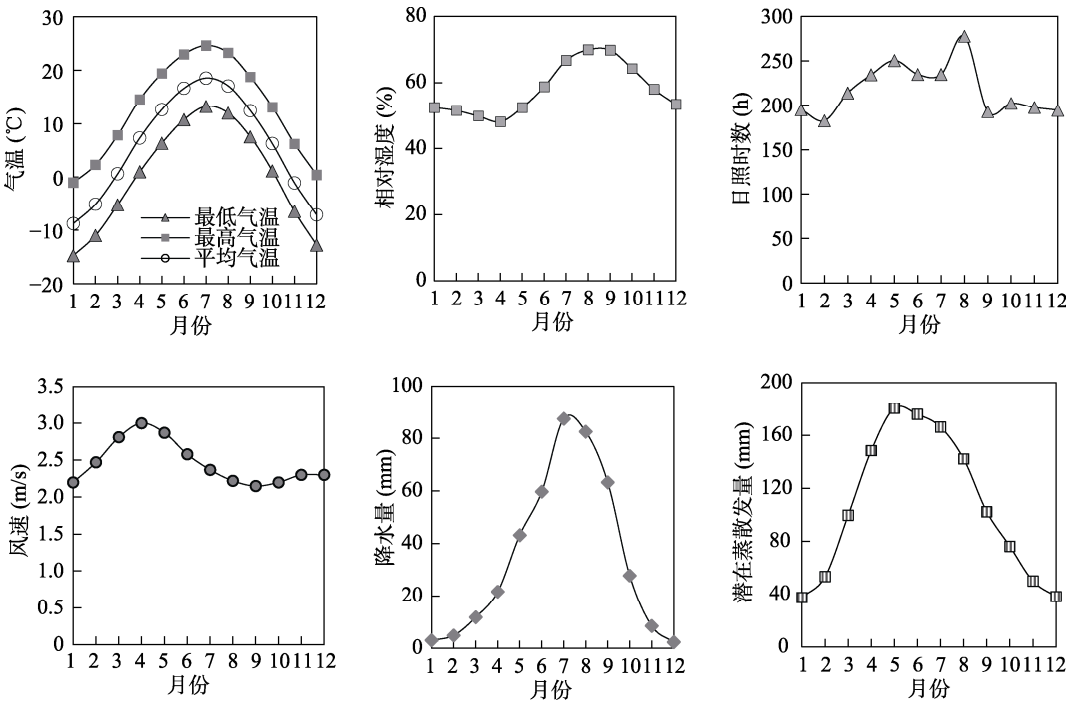


图 2 黄河流域气象因子季节性变化

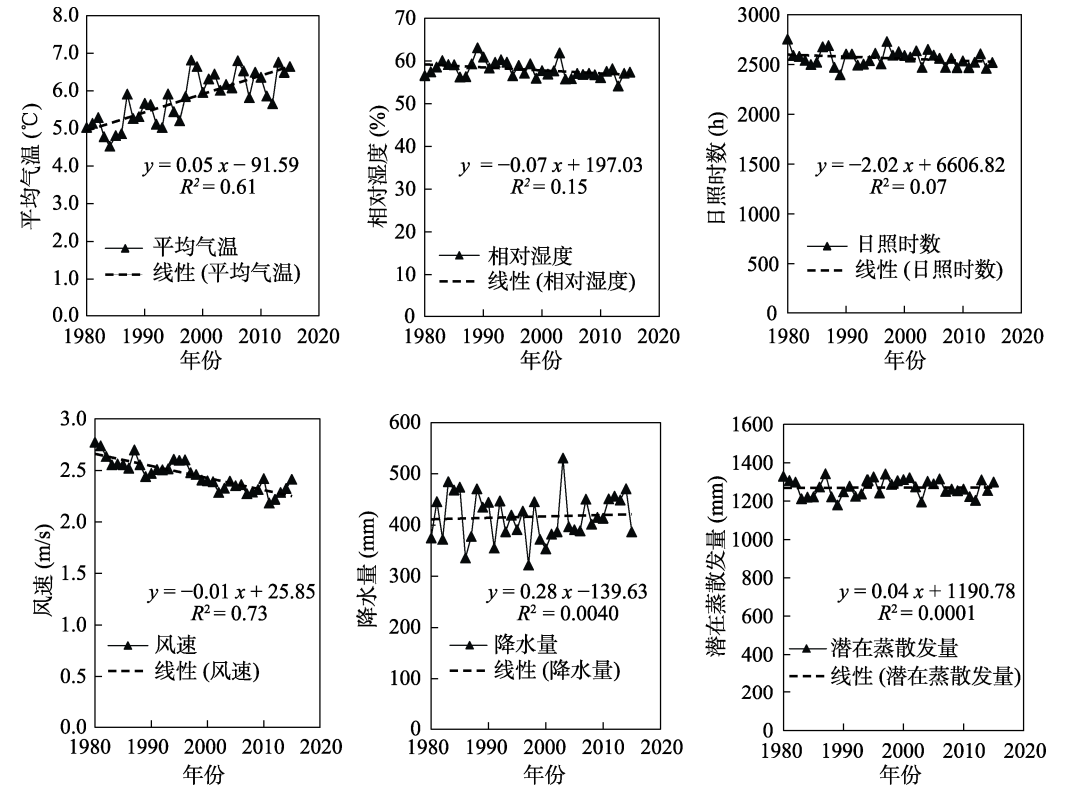


图 3 黄河流域气象因子年际变化

大值; 2) 夏季降水量大幅增加, 日照时数波动明显, 先小幅下降, 后增加, 气温明显升高, 风速逐渐降低, 空气相对湿度增加, 潜在蒸散发量逐渐下降; 3) 秋季随着日照时数减小, 气温逐渐回落, 降水减少, 风速减小, 相对湿度减小, 潜在蒸散发量也逐渐减小; 4) 冬季日照时数、降水、风速和相对湿度波动较小, 温度持续走低, 潜在蒸散发量也逐渐降至全年最低。

(2) 年际变化

自 1980–2015 年以来, 黄河流域气象因子年际变化时空异质性较大。从流域平均值来说, 平均气温呈显著上升趋势, 年际变化率(线性倾斜度, 下同)为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$; 相对湿度和风速呈显著下降趋势, 年际变化率分别为 $-0.7\%/10\text{a}$ 和 $-0.1\text{ m/s}/10\text{a}$; 而日照时数、降水量和潜在蒸散发量年际变化趋势不明显。从各气象因子的年际变化空间分布格局来看, 黄河源区气温增加幅度明显大于黄河中游地区; 最高气温、最低气温和平均气温的流域平均增温幅度非常接近(约为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$), 但三者的空间分布格局存在差异(图 4a、4b、4c); 南部地区日照时数呈增加趋势, 而东部地区日照时数呈减小趋势(图 4d); 黄河源区、东南部地区和北部地区相对湿度呈减小趋势, 祁连山至秦岭一带、鄂尔多斯内流区、陕北、宁夏中南部等地区相对湿度呈增加趋势(图 4e); 黄河源区和黄河中游的西北部地区平均风速呈增加趋势, 东南部风速呈减小趋势(如图 4f); 约 30.7% 的地区降水呈减小趋势, 主要分布在黄河流域南部地区, 平均年际变化率为 $-9.0\text{ mm}/10\text{a}$, 69.3% 的地区降水呈增加趋势, 主要分布在黄河流域北部地区, 平均年际变化率为 $8.1\text{ mm}/10\text{a}$ (图 4h); 约 51.2% 的地区潜在蒸散发量呈减小趋势, 主要分布在黄河源和西北部地区, 平均年际变化率为 $-18.3\text{ mm}/10\text{a}$, 48.9% 的地区潜在蒸散发量呈增加趋势, 主要分布在黄河流域中南部和东部地区, 平均年际变化率为 $20.0\text{ mm}/10\text{a}$ (图 4g)。

4.3 数据验证

对插值网格月降水量、潜在蒸散发量、最高气温、最低气温、平均气温和日照时数的预测标准误差进行了评价。最低气温、最高气温、平均气温的预测标准误差分别为 $1.18\text{--}1.33$ 、 $0.86\text{--}1.06$ 、 $0.80\text{--}0.95\text{ }^{\circ}\text{C}$; 平均风速、相对湿度和潜在蒸散发的预测标准误差分别为 $0.69\text{--}0.83\text{ m/s}$, $4.54\%\text{--}5.55\%$, $6.52\text{--}7.88\text{ mm}$; 降水量和日照时数的预测标准误差分别为 $1.03\text{--}1.21\text{ mm}$ 和 $19.43\text{--}21.84\text{ h}$ (表 3)。在空间上, 预测标准误差较大的区域主要位于西北和高海拔气象站点较为稀疏的地区。在时间尺度上, 夏季月平均气温的预测标准误差明显小于冬季。平均最低温度的预测标准误差最大。冬季降水月平均预报标准误差小于夏季, 与降水量呈正相关。潜在蒸散发 4–8 月份误差相对较大。

5 讨论与总结

5.1 讨论

本研究综合考虑地形地貌对气温、风速和湿度空间分异规律的影响, 辐射、湿度、风速等因子对潜在蒸散发量的影响, 分别构建不同变量的薄盘光滑样条函数, 有效表达了气象因子的空间分异特征。此外, 本研究的潜在蒸散发量由 FAO 推荐的 P-M 法计算所得。在计算太阳辐射量时, 为了确定不同区域辐射量计算中的两个经验参数 a_s 和 b_s , 以蒸发皿蒸发作为参数率定的目标值。因此, 本研究所指的潜在蒸散发量实际上为水面蒸发量而不

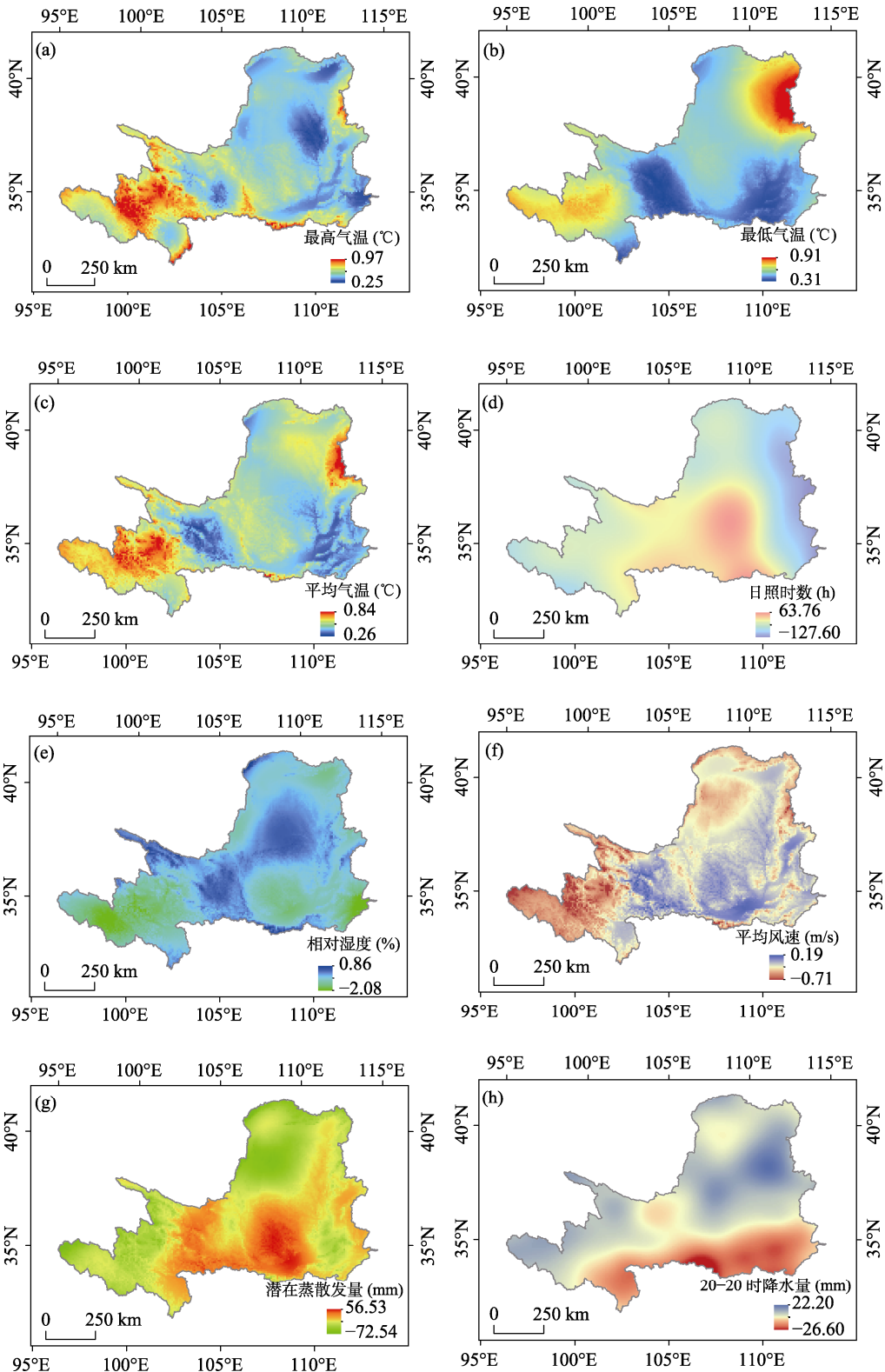


图 4 黄河流域气象因子年际变化空间分布格局

表 3 气象因子空间插值精度评价

气象因子	指标	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	均值
最低温度 (℃)	最小值	1.72	1.45	1.17	1.08	1.03	0.97	0.86	0.87	0.94	1.10	1.35	1.62	1.18
	最大值	1.91	1.62	1.33	1.21	1.15	1.09	0.99	1.03	1.07	1.20	1.51	1.81	1.33
	均值	1.75	1.48	1.21	1.11	1.05	0.99	0.89	0.90	0.96	1.11	1.40	1.65	1.21
最高温度 (℃)	最小值	0.94	0.94	0.86	0.96	0.86	0.78	0.81	0.82	0.79	0.81	0.85	0.92	0.86
	最大值	1.15	1.17	1.10	1.16	1.02	0.97	1.02	0.99	0.96	0.97	1.02	1.15	1.06
	均值	0.99	1.00	0.94	1.00	0.90	0.86	0.86	0.87	0.84	0.84	0.89	1.00	0.92
平均温度 (℃)	最小值	1.12	0.94	0.73	0.74	0.70	0.68	0.63	0.62	0.67	0.74	0.93	1.09	0.80
	最大值	1.28	1.09	0.94	0.89	0.82	0.81	0.77	0.77	0.80	0.86	1.06	1.25	0.95
	均值	1.15	0.97	0.82	0.77	0.73	0.71	0.67	0.67	0.70	0.76	0.96	1.15	0.84
日照时数 (h)	最小值	21.31	17.17	18.28	18.19	19.33	20.62	22.00	20.90	17.87	17.59	18.25	21.67	19.43
	最大值	23.76	19.40	20.75	20.39	21.99	23.01	24.64	23.74	20.14	19.73	20.42	24.09	21.84
	均值	21.82	17.68	18.87	18.70	19.95	21.12	22.59	21.57	18.40	18.06	18.72	22.18	19.97
风速 (m/s)	最小值	0.74	0.69	0.7	0.67	0.64	0.61	0.6	0.6	0.61	0.63	0.71	0.74	0.69
	最大值	0.87	0.83	0.81	0.79	0.74	0.72	0.7	0.7	0.7	0.73	0.85	0.87	0.83
	均值	0.77	0.72	0.72	0.7	0.66	0.63	0.62	0.62	0.62	0.65	0.74	0.77	0.72
相对湿度 (%)	最小值	5.50	4.90	4.32	4.04	4.05	4.02	3.75	3.93	4.32	4.60	5.30	5.80	4.54
	最大值	6.48	6.00	5.26	5.06	4.80	4.79	4.98	5.02	5.21	5.36	6.29	6.72	5.50
	均值	5.79	5.14	4.57	4.32	4.22	4.24	4.12	4.26	4.53	4.79	5.60	5.99	4.80
降水 (mm)	最小值	0.58	0.66	0.79	0.93	1.15	1.38	1.83	1.72	1.20	0.87	0.70	0.57	1.03
	最大值	0.68	0.76	0.92	1.09	1.33	1.63	2.13	2.03	1.44	1.05	0.80	0.66	1.21
	均值	0.60	0.68	0.82	0.97	1.20	1.45	1.91	1.79	1.26	0.91	0.72	0.59	1.08
潜在蒸 散发 (mm)	最小值	4.22	4.59	6.73	8.46	9.32	8.9	8.49	7.57	5.87	4.97	4.59	4.58	6.52
	最大值	4.63	5.15	7.77	10.08	11.3	11.24	10.86	9.82	7.49	6.1	5.15	5.01	7.88
	均值	4.31	4.71	6.98	8.86	9.82	9.48	9.09	8.12	6.29	5.27	4.71	4.67	6.86

是陆面蒸散发量，代表地区的最大蒸发能力。与该地区以往研究相比，本研究的潜在蒸散发量略高于以往研究^[23-27]；但与基于蒸发皿蒸发相关的研究数值基本一致^[28]。廖晓芳等指出蒸发皿蒸发和 P-M 法计算的潜在蒸散发空间分布规律非常一致^[29]，数值上相关性很高，在黄河流域具有较高的适应性。

本文基于气象站点实测数据，研发了黄河流域中上游地区 8-km 分辨率月度网格气象数据集（1980–2015），采用广义交叉验证对插值结果进行了检验。在此基础上，分析了黄河流域中上游地区气候特征、年际变化趋势及空间分布格局，主要结论如下：

（1）基于 ANUSPLIN 的样条插值结果受站点分布和季节变化影响。高海拔气象站点较稀疏的地区，插值精度误差相对较大；在时间尺度上，气温、相对湿度和平均风速夏季插

值精度高于冬季;日照时数、降水量和潜在蒸散发量夏季插值精度低于冬季,其中前二者插值误差在7月份达到最大值,平均插值误差分别为22.6 h和1.9 mm,而潜在蒸散发量插值误差在5月份达到最大值,平均插值误差为9.8 mm。

(2) 黄河流域气象特征空间异质性明显,且具有较强的季节性特征。1) 黄河源区气候特征表现为:温度较低、日照时数较高、风速较大、潜在蒸散发量较小;北部地区降水量较小,相对湿度较小;南部地区降水量较大,相对湿度也较大。2) 黄河流域中游地区气候特征表现为:东南部气候相对湿润,呈气温高、日照时数相对短、风速较小、降水量相对较大、潜在蒸散发量相对较小的特点;西北部气候干燥,呈冬季气温低、夏季气温高、日照时数相对较长、风速较大、降水量小、潜在蒸散发量大的特点。

(3) 自1980–2015年以来,黄河流域气象因子发生了明显变化,主要特点如下:1) 温度显著上升,年际变化率为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$;2) 相对湿度和风速呈显著下降趋势,年际变化率分别为 $-0.7\%/10\text{a}$ 和 $-0.1\text{ m/s}/10\text{a}$;3) 日照时数、降水量和潜在蒸散发量年际变化趋势不明显。

作者分工: 罗毅对数据集的研发做了总体指导;孙林计算了潜在蒸散发、汇总整理站点数据、提取了黄河流域上中游流域边界;李洪宇对插值后数据做了格式转换;王亚琴做了空间插值和撰写了数据论文。

利益冲突声明: 本研究不存在研究者以及与公开研究成果有关的利益冲突。

参考文献

- [1] Liu, Q., McVicar, T. R., Yang, Z., *et al.* The hydrological effects of varying vegetation characteristics in a temperate water-limited basin: development of the dynamic Budyko-Choudhury-Porporato (dBCP) model [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 543: 595–611.
- [2] 夏军, 彭少明, 王超等. 气候变化对黄河水资源的影响及其适应性管理[J]. 人民黄河, 2014, 36(10): 1–4, 15.
- [3] 刘昌明, 刘小莽, 田巍等. 黄河流域生态保护和高质量发展亟待解决缺水问题[J]. 人民黄河, 2020, 42(9): 6–9.
- [4] 黄建平, 张国龙, 于海鹏等. 黄河流域近40年气候变化的时空特征[J]. 水利学报, 2020, 51(9): 1048–1058.
- [5] Chen, Y., Wang, K., Lin, Y., *et al.* Balancing green and grain trade [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8: 739–741.
- [6] 肖风劲, 徐雨晴, 黄大鹏等. 气候变化对黄河流域生态安全影响及适应对策[J]. 人民黄河, 2021, 43(1): 10–14, 52.
- [7] 赵建华, 刘翠善, 王国庆等. 近60年来黄河流域气候变化及河川径流演变与响应[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 1–5, 12.
- [8] Feng, X., Fu, B., Piao, S., *et al.* Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits [J]. *Nature Climate Change*, 2016b, 6: 1019–1022.
- [9] 叶培龙, 张强, 王莺等. 近40年黄河上游气候变化特征及其对生态植被和径流量的影响[J/OL]. 大气科学学报: 1–21 [2021-05-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1803.P.20201104.1723.004.html>.
- [10] 郑子彦, 吕美霞, 马柱国. 黄河源区气候水文和植被覆盖变化及面临问题的对策建议[J]. 中国科学院

- 院刊, 2020, 35(1): 61–72.
- [11] 郭帅, 裴艳茜, 胡胜等. 黄河流域植被指数对气候变化的响应及其与水沙变化的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 1–7, 13.
- [12] 刘志红, Tim, R. M., Li L., 等. 基于 ANUSPLIN 的时间序列气象因子空间插值[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2008(10): 227–234.
- [13] 吴立新. 地理信息系统原理与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [14] 孙然好, 刘清丽, 陈利顶. 基于地统计学方法的降水空间插值研究[J]. 水文, 2010, 30(1): 14–17, 58.
- [15] 岳文泽, 徐建华, 徐丽华. 基于地统计方法的气候要素空间插值研究[J]. 高原气象, 2005(6): 974–980.
- [16] 刘志红, Tim, R. M., Van, N., 等. 专用气候数据空间插值软件 ANUSPLIN 及其应用[J]. 气象, 2008b(2): 92–100.
- [17] Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., *et al.* Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas [J]. *International Journal of Climatology*, 2005, 25: 1965–1978.
- [18] Wang, Y. Q., Luo, Y., Shafeeque, M. Using Gaussian Function to describe the seasonal courses of monthly precipitation and potential evapotranspiration across the Yellow River basin, China [J]. *Journal of Hydro-meteorology*, 2019, 20(11): 2185–2201.
- [19] Hutchinson, M. F. Anusplin Version 4.2 User Guide [M]. Cauberra: Australian National University, 2001.
- [20] 王亚琴, 孙林, 李洪宇等. 黄河流域上中游地区月度 8-km 网格气象数据集(1980–2015)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2021. <https://doi.org/10.3974/geodb.2021.07.09.V1>. <https://cstr.escience.org.cn/CSTR:20146.11.2021.07.09.V1>.
- [21] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策 [OL]. [https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05\(2017年更新\)](https://doi.org/10.3974/dp.policy.2014.05(2017年更新)).
- [22] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., *et al.* Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements, in: irrigation and drainage paper 56 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization, 1998.
- [23] 李志. 参考作物蒸散简易估算方法在黄土高原的适用性[J]. 农业工程学报, 2012a, 28(6): 106–111.
- [24] 李志. 黄土高原 1961–2009 年参考作物蒸散量的时空变异[J]. 生态学报, 2012b, 32(13): 4139–4145.
- [25] Zhao, Y., Zou, X., Zhang, J., *et al.* Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau region of China, during 1961–2012 [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 196–206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.050>.
- [26] Li, Y., Liang, K., Bai, P., *et al.* The spatiotemporal variation of reference evapotranspiration and the contribution of its climatic factors in the Loess Plateau, China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75: 354.
- [27] 宁婷婷. Budyko 框架下黄土高原流域蒸散时空变化及其归因分析[D]. 杨凌: 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 2017.
- [28] 张鹏飞, 赵广举, 穆兴民等. 渭河流域蒸发皿蒸发量时空变化与驱动因素[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 973–979.
- [29] 廖晓芳, 钱胜, 彭彦铭等. 蒸发皿蒸发和潜在蒸散发对气候变化的响应[J]. 人民黄河, 2010, 32(11): 42–44.