

吉林省蒸发皿蒸发量时空变化特征及其成因定量化分析

岳元¹, 刘海峰¹, 秦孟晟², 颜雅琼³, 陈长胜¹, 王琪⁴

(1.吉林省气象台, 长春 130062; 2.扬州市气象台, 江苏 扬州 225009;

3.宿迁市气象局, 江苏 宿迁 223800; 4.吉林省气象科学研究所, 长春 130062)

摘 要:为了分析气候变化背景下吉林省蒸发皿蒸发量时空变化特征及其成因,利用吉林省 45 个气象站 1970—2014 年的蒸发皿资料,分析 45 a 蒸发皿蒸发量的变化趋势,同时结合其他常规气象资料定量化分析了影响蒸发皿蒸发量变化的因素。结果表明:过去 45 a 中吉林省年蒸发皿蒸发量呈显著下降趋势($-22.49\text{ mm}/10\text{ a}$)。四季中,春季蒸发皿蒸发量减少的最多,而其他 3 个季节中虽有小幅上升,但并不显著。影响吉林省地区年蒸发皿蒸发量变化主导因子是风速和水汽压差,由于负贡献超过正贡献,导致 45 a 中年蒸发皿蒸发量呈下降趋势。影响春季蒸发变化的主导因素是风速,而夏、秋、冬 3 个季节中的主导因素则是水汽压差。空间上,影响吉林省西部和中部蒸发年变化的主导因子是风速和日照时数,而南部地区则是水汽压差。四季中,风速和日照时数是影响多数气象站春季蒸发变化的主导因子,其他季节中水汽压差的正贡献是影响蒸发变化的主导因子。

关键词:吉林省; 气象因子贡献; 蒸发皿蒸发量

中图分类号:P332.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)02-0176-08

Temporal-Spatial Variations of Pan Evaporation and Quantification of the Causes in Jilin Province

YUE Yuan¹, LIU Haifeng¹, QIN Mengsheng², YAN Yaqiong³, CHEN Changsheng¹, WANG Qi⁴

(1.Meteorological Observatory of Jilin Province, Changchun 130062, China;

2.Yangzhou Meteorological Observatory, Yangzhou, Jiangsu 225009, China; 3.Suqian Meteorological Bureau,

Suqian, Jiangsu 223800, China; 4.Institute of Meteorology Science of Jilin Province, Changchun 130062, China)

Abstract: In order to analyze the spatial-temporal evolution characteristics and causes of pan evaporation in Jilin Province under the background of climate change, based on the data of 45 weather stations in Jilin Province from 1970 to 2014, the trend of pan evaporation in 45 years was analyzed. the factors affecting pan evaporation were quantitatively analyzed by combining with other conventional meteorological data. The results showed that: in the past 45 years, the annual pan evaporation in Jilin Province showed the significant decrease($-22.49\text{ mm}/\text{decade}$); among the four seasons, the decline rate of evaporation in spring was the highest, and the changing trend slightly rose, but was not significant in other three seasons; the wind speed and water vapor pressure difference were the main factors affecting the annual pan evaporation in Jilin Province; the annual pan evaporation showed a decline trend in the 45 years because the negative contribution was more than the positive contribution; spatially, wind speed and sunshine hours were the main factors affecting the annual variation of evaporation in the west and central part of Jilin Province, while the water vapor pressure difference was the main factor in the southern region; in the four seasons, wind speed and sunshine hours were the main factors affecting the variation of evaporation in the most stations in spring; the positive contribution of water vapor pressure difference in other seasons was the main factor affecting the variation of evaporation.

Keywords: Jilin Province; contribution of meteorological factors; pan evaporation

收稿日期:2020-03-02

修回日期:2020-05-02

资助项目:江苏省气象局青年基金(KQ202015);江苏省气象局青年基金(KQ202016);国家自然科学基金面上项目(41875119005761)

第一作者:岳元(1989—),男,吉林长春人,博士,研究方向为应用气象。E-mail:467163562@qq.com

通信作者:陈长胜(1976—),男,吉林磐石人,研究员,博士,主要从事天气研究。E-mail:chencs_iap@163.com

蒸发作为地—气系统间水分循环中关键一环,是表征大气水分循环过程的重要参量。蒸发皿蒸发量作为我国气象部门的重要观测项目,其数值的大小可以有效表征大气的干湿程度。根据 IPCC 第 5 次报告^[1]指出 1983—2012 年全球气温已经上升 0.85°C ,至 21 世纪末全球地表平均温度将在 1986—2005 年的基础上再升高 $0.3\sim 4.8^{\circ}\text{C}$ 。气温升高本应加快地—气系统之间水分循环,但相关观测结果表明蒸发皿蒸发量并没有随温度升高而增加,反而出现不同程度的下降^[2-4]。Michael 等^[5]将这种蒸发量随温度升高出现下降的现象定义为“蒸发悖论”(evaporation paradox)。这种与常识相悖的现象使得人们开始关注蒸发皿蒸发量的变化趋势,并尝试分析影响蒸发皿蒸发量变化的原因^[6-11]。研究显示造成“蒸发悖论”的原因主要有以下 4 点:(1) 大气中云量增加,太阳辐射量下降,进而陆地水分蒸发量下降^[12-15];(2) 气溶胶等大气污染物的浓度逐年增加,导致太阳辐射量下降^[16-17];(3) 空气湿度增加,水汽压差减小^[18];(4) 夏季季风减弱,地面风速下降^[19-20]。

针对于蒸发皿蒸发量的变化国内的相关研究更多集中与一些河流地区,如黄河流域^[21]、黄淮海流域^[22]、黑河流域^[23]、海河流域^[24]、长江流域^[25]。针对吉林省的蒸发皿蒸发量的变化趋势以及造成趋势变化的定量化成因分析的研究则相对较少。吉林省地处我国东北地区中部,属于典型的温带季风性气候^[26],夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。作为我国的粮食主产区和重要的商品粮生产基地,作物生长季内雨热同季,蒸发和气温的变化对于区内相关的农业生产有重要影响。因此有必要对吉林省蒸发皿蒸发量时空分布特征及引起吉林蒸发皿蒸发量变化的主要原因进行分析。这将有助于了解气候变化背景下吉林省地区水分循环的情况,并为科学评价影响吉林省干湿变化提供依据。

本文利用 1970—2014 年吉林省资料完整的 45 个气象站的 20 cm 口径蒸发皿蒸发量及相应气象要素的实测资料,分析吉林省蒸发皿蒸发量的变化趋势,同时依据偏微分法采用蒸发皿蒸发量变化成因定量化估算模型定量化的描述蒸发量变化过程中,各气象因子的贡献量以及其时空分布特征,并分析引起吉林省蒸发量变化的主要原因。

1 研究区概况

本文采用吉林省(东经 $121^{\circ}38'\sim 131^{\circ}19'$,北纬

$40^{\circ}50'\sim 46^{\circ}19'$) 1970—2014 年资料系列完整的 45 个气象站作为研究对象(图 1),同时对所选取站点的数据进行质量检测,对其中明显错误和不合理的数据进行订正,对于缺测漏测的数据进行插值处理。研究主要选取的逐日观测数据包括:蒸发皿蒸发量(mm)、平均气温($^{\circ}\text{C}$)、最高气温($^{\circ}\text{C}$)、最低气温($^{\circ}\text{C}$)、10 m 高的风速(m/s)、日照时数(h)、水气压(hPa)。针对大型蒸发皿,本研究按照换算系数^[27]统一折算成 20 cm 口径的蒸发皿的蒸发量之后再使用。

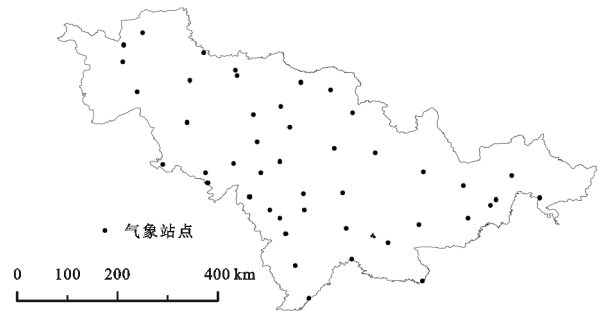


图 1 吉林省站点分布

2 研究方法

2.1 气候倾向率

将气象要素随时间的变化用一次线性方程拟合,即:

$$\hat{x}_t = a_0 + a_1 T \quad (1)$$

式中: \hat{x}_t 为气象要素的拟合值; $a_1 \times 10$ 称为气象要素的气候倾向率,表示平均每 10 a 的某一气象要素的变化率; a_0 为常数项。

2.2 气候趋势系数

为定性分析在气候变化背景下气象要素的升降程度,以方便直接地观察某一气象要素的升降程度。本文引入气候趋势系数 r_{xt} ,气候趋势系数定义为 n 个时刻(年)的气象要素序列与其年份数列 1, 2, 3, ..., n 的相关系数。

$$r_{xt} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (i - \bar{t})^2}} \quad (2)$$

式中: n 为年数; x_i 为第 i 年要素值; \bar{x} 为其样本均值; $\bar{t} = (n+1)/2$ 。显然,这个值为正(负)时,表示该气象要素在所计算的 n 年内有线性增(降)的趋势。

2.3 非参数 Z 统计量检验法

对于某一气象要素序列,在 i 时刻有:

$$r_i = \begin{cases} +1, & (x_j > x_i) \\ +0, & (x_j < x_i) \end{cases} \quad j = i+1, \dots, n \quad (3)$$

由公式(3)可见, r_i 是 i 时刻以后 x_j 大于该时刻 x_i 的样本个数。

计算统计量:

$$Z=\frac{4}{n(n-1)}\sum_{i=1}^{n-1}r_i-1 \tag{4}$$

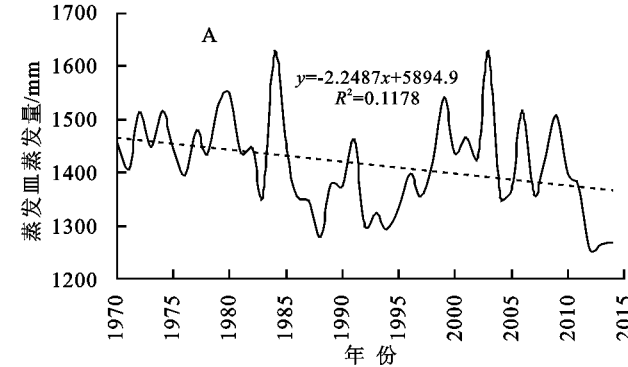
其中 Z 值在 $-1\sim 1$ 变化,若 Z 值 >0 表示序列递增, Z 值 <0 表示序列递减。若 $|Z|>|Z_{0.05}|$,则认为变化趋势在 0.05 显著性水平下是显著地。本文中的 $Z_{0.05}=0.20$ 。

2.4 蒸发皿蒸发量变化成因定量化估算模型

某一地区蒸发皿蒸发量大小变化是不同气候因子共同作用的结果。这些气候因子大体上可以分为 3 类,分别是热力因子、动力因子和湿度因子。其中热力因子包括日平均气温(TA)和日照时数(SD),动力因子为风速(WD),湿度因子则为水汽压差(VPD)。借鉴 Penman-Monteith 公式,将蒸发皿蒸发量大小的变化定义为上述 4 个气象因子的函数,即 $E_{\text{pan}}=f(\text{TA}, \text{WD}, \text{VPD}, \text{SD})$ 。因此采用偏微分法,将蒸发皿蒸发量(E_{pan})随时间的变化进一步分解为:

$$\begin{aligned} \frac{dE_{\text{pan}}}{dt} &= \frac{\partial E_{\text{pan}}}{\partial \text{TA}} \cdot \frac{d\text{TA}}{dt} + \frac{\partial E_{\text{pan}}}{\partial \text{WD}} \cdot \frac{d\text{WD}}{dt} + \\ &\quad \frac{\partial E_{\text{pan}}}{\partial \text{VPD}} \cdot \frac{d\text{VPD}}{dt} + \frac{\partial E_{\text{pan}}}{\partial \text{SD}} \cdot \frac{d\text{SD}}{dt} \end{aligned} \tag{5}$$

公式(5)表明蒸发皿蒸发量的大小主要受到上述 4 个气象因子共同制约,公式右侧 4 项分别代表气



温、风速、水汽压差以及日照时数对蒸发皿蒸发量变化的贡献,其中导致 E_{pan} 量上升的为正贡献,导致 E_{pan} 量下降的为负贡献。通过比较各个气象因子之间贡献的绝对值的大小,分析影响吉林省蒸发皿蒸发量变化的主导因子。

3 结果与分析

3.1 吉林省地区蒸发皿蒸发量的时空特征

3.1.1 吉林省蒸发皿蒸发量的多年变化趋势 近 45 a 来吉林省地区蒸发皿的平均年蒸发量呈现出随时间下降的变化趋势,其倾向率为 $22.49 \text{ mm}/10 \text{ a}$, $Z_E = -0.24$, $|Z_E| > Z_{0.05} = 0.2$,这种下降趋势满足非参数 Z 统计量检验法 $\alpha=0.05$ 检验(图 2A)。图 2 分别为吉林省蒸发皿年总蒸发量的时间拟合趋势线和累积距平的变化。从中发现,吉林省蒸发皿年总蒸发量呈明显下降趋势,平均每 10 a 减少 22.49 mm。尤其是 1984—1994 年蒸发量的下降最为明显,之后蒸发量下降趋势有所减缓,但整体上仍呈现下降趋势。分析发现 1970—1984 年吉林省的年总蒸发量基本高于 45 a 的平均值,1984 年之后则基本呈现出小于 45 a 平均值的变化趋势,虽然 2000 年之后蒸发量出现小幅的上升,但上升幅度不大,整体上仍小于 45 a 的平均值。

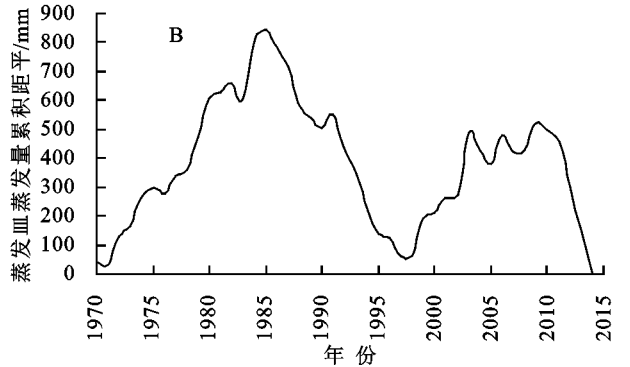


图 2 1970—2014 年吉林省年总蒸发量时间拟合趋势及其累积距平的变化

虽然近 45 a 中吉林省年蒸发皿蒸发量的变化形式呈下降趋势,但在四季中影响蒸发量变化的气温、风速、水汽压差等气象因素存在一定的差异,这就使得不同季节之中蒸发皿蒸发量的变化趋势存在差异。表 1 中给出不同季节中吉林省蒸发皿蒸发量的变化趋势。从中发现吉林省春季蒸发皿蒸发量下降最快,平均每 10 a 下降 29.02 mm,且下降趋势通过 $\alpha=0.01$ 显著性检验。而其他 3 个季节中吉林省的蒸发皿蒸发量则呈微弱变化,但并未通过显著性检验,即夏、秋、冬 3 个季节中蒸发量虽呈上升趋势,但趋势并不明显。

3.1.2 吉林省蒸发皿蒸发量的空间分布 吉林省年蒸发皿蒸发量的空间分布形式基本上呈现出自西向东阶梯式逐步递减的分布形式。高值区集中出现的

吉林西部地区,在 1 700 mm 以上。而蒸发低值区出现在吉林东部通化、白山和延吉地区,均在 1 300 mm 以下。中部地区的年蒸发量则是在 1 700~1 300 mm 变化(图 3)。某一地区蒸发皿蒸发量的大小是受气温、风速、辐射、相对湿度等气候因子的共同影响的,因此蒸发量的空间分布形式也会因这些因素分布的不均匀而产生差异。此外地形差异导致气象要素分布差异进而造成蒸发量自西向东递减的分布形式。吉林省地形上呈东高西低的形式。西部平原是半干旱区,西部地区年降水的分布并不均匀、空气干燥且大风日数多,日照充足,利于蒸发。而吉林省中部丘陵和东部山区则分别地处半湿润区和湿润区,区内气候相对湿度,蒸发相较西部地区有所减少。

| 表 1 吉林省不同季节蒸发皿蒸发量的变化 | | | | | |
|----------------------|---------|----------|------|------|------|
| 季节 | 全年 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
| 气候倾向率/ (mm/10 a) | -22.49* | -29.02** | 2.13 | 2.69 | 1.71 |
| 气候趋势 系数 | -0.33* | -0.64** | 0.05 | 0.13 | 0.20 |

注:**表示通过 0.01 的显著性检验,*表示通过 0.05 显著性检验。

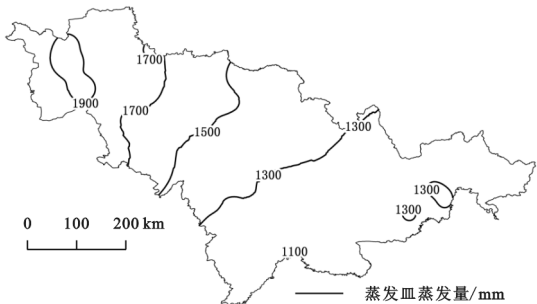


图 3 吉林省地区年蒸发皿蒸发量的空间分布

吉林省地区不同季节蒸发皿蒸发量的分布形式与年蒸发量的空间分布一致,也自西向东呈阶梯式递减的分布形式(表 2)。分析发现不同季节不同地区之间的蒸发量统计量差距存在差异,其中春、夏、秋 3 个季节中西部地区的蒸发皿蒸发量要明显多于中部和东部地区,而冬季全省不同地区之间蒸发量差距不大,全省不同地区之间蒸发量趋于相同。春、夏、秋 3 个季节中全

表 3 吉林省蒸发驱动因子每 10 a 年、季变化趋势

| 驱动因子 | 年 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
|-------------------------|----------|----------|---------|---------|---------|
| 气温/℃ | 0.34* | 0.28* | 0.20* | 0.30* | 0.40* |
| 风速/(m·s ⁻¹) | -0.27** | -0.32** | -0.18* | -0.28** | -0.24** |
| 日照时数/h | -53.70** | -18.90** | -13.90* | -11.20* | -9.70 |
| 水汽压差/hPa | 0.23* | 0.15 | 0.36* | 0.25* | 0.08 |

3.2 气象因子对蒸发皿蒸发量变化贡献的时空分布特征

蒸发皿蒸发量的变化是气温、风速、日照时数以及水汽压差变化共同影响的结果。各气象因子的变化导致近 45 a 吉林省年、季蒸发皿蒸发量出现不同的变化趋势。因此本文选择 1970—2014 年吉林省的蒸发皿蒸发量以及相关气象数据,以 1970 年为基准年分析过去 45 a 蒸发变化过程中各气象因子的贡献,以便厘清各气象因子在影响吉林省蒸发皿蒸发量演变过程中所起的作用。

分析成因定量化估算模型(公式 5)计算结果发现,平均气温对吉林省蒸发皿蒸发量年变化的平均贡献为 0.84 mm/a。在气候变暖的背景下,平均气温在全省 82%的站点中表现为正贡献(图 4),即平均气温的增加导致蒸发量增加。不同地区之间,气温正贡献高值区集中出现在吉林西部地区,其正贡献值超过 3 mm/a。气温正贡献在 1.5~3.0 mm/a 和 0~1.5

省影响蒸发变化的气象要素自西向东存在差异,进而导致蒸发量分布存在西多东少的分布形式。而吉林省冬季寒冷漫长,全省范围内各气象要素分布相似,差距不大,所以冬季全省范围内蒸发皿蒸发量相近。

表 2 吉林省不同季节蒸发皿蒸发量统计 mm

| 地区 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
|----|--------|--------|--------|-------|
| 西部 | 643.87 | 689.31 | 340.26 | 74.83 |
| 中部 | 560.96 | 578.41 | 294.82 | 71.96 |
| 东部 | 432.97 | 484.90 | 253.39 | 70.49 |

3.1.3 吉林省蒸发驱动因子的演变趋势 分析过去 45 a 中驱动吉林省蒸发量变化的主要驱动因子的变化趋势发现(表 3),年和四季中不同驱动因子的变化趋势存在差异。不同驱动因子中,年和四季中气温呈不同程度增加趋势,且均通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验。年、季中风速虽均呈显著下降的趋势,但强度有所不同。其中夏季风速的下降趋势通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验,其他时间中风速是在 $\alpha=0.01$ 水平上显著下降。吉林省 45 a 中年、季平均日照时数呈下降的趋势,其中冬季的日照时数虽有下降但并不显著,其他时间中的下降趋势的显著水平在 95%以上。年、季中水汽压则出现不同程度增加,其中春、冬两季中增加的趋势并不明显。

mm/a 的站点数分别有 12,21 个,在全省范围内自西向东均有分布。气温贡献为负值的站点仅有 8 个,出现在吉林中部和南部地区。不同季节中气温对吉林省蒸发量变化的平均贡献分别为 0.47,0.78,0.37,0.21 mm/a(表 4)。四季气温贡献的空间分布形式与全年的分布形式相近,只是不同季节中气温对蒸发量贡献绝对值的大小有所下降。

风速对吉林省蒸发皿蒸发量年变化平均贡献为 -1.77 mm/a,表明风速下降导致吉林省蒸发皿蒸发量下降。空间上,全省 45 个气象站中,共有 33 个气象站的风速贡献值为负,占总数的 73%。负贡献的站点在全省范围内均有分布,但绝对值大小有所不同。其中负贡献高值区出现在西部的白城地区,超过 -8 mm/a;负贡献的次高值区出现在吉林的中部地区,负贡献为 -8.0~-4.0 mm/a;东南部地区的风速负贡献较低,为 -4.0~0 mm/a。风速正贡献的站点有 12 个,分布并没有明确的区域特征,且贡

献值均小于 4.0 mm/a。不同季节中,风速对 E_{pan} 变化的负贡献的大小存在差异(表 4)。其中春季风速

的负贡献最大,其他夏、秋、冬 3 个季节中风速负贡献依次次之。

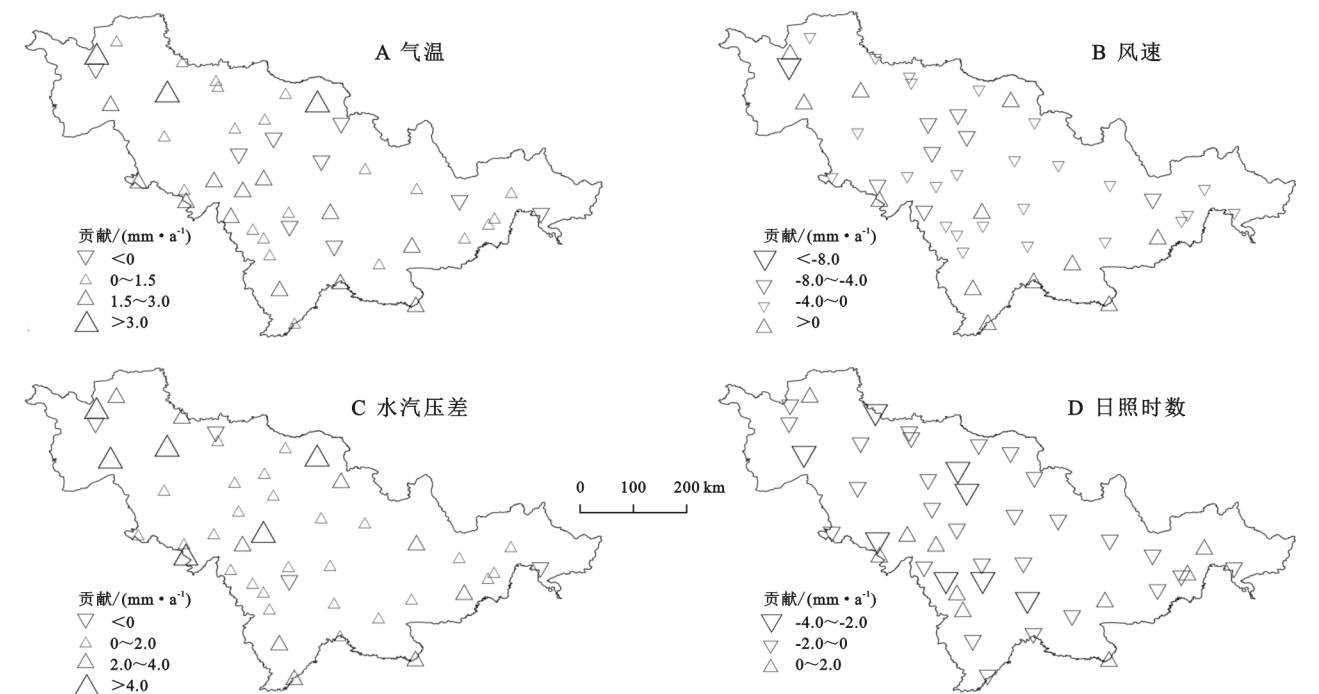


图 4 吉林省地区不同气象因子对蒸发皿蒸发量年变化贡献的空间分布

表 4 气象因子对年、季蒸发皿蒸发量的平均贡献

| 气象因子 | mm/a | | | | |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 年 | 春季 | 夏季 | 秋季 | 冬季 |
| 气温 | 0.84 | 0.47 | 0.78 | 0.37 | 0.21 |
| 风速 | -1.77 | -0.96 | -0.42 | -0.11 | -0.10 |
| 水汽压差 | 1.64 | 0.51 | 1.32 | 0.75 | 0.25 |
| 日照时数 | -0.93 | -0.95 | -0.57 | -0.20 | 0.03 |

水汽压差的大小直接反映了大气的干燥程度。分析发现,水汽压差对蒸发量年变化的平均贡献为 1.64 mm/a。其中正贡献的站点有 41 个,占总数的 91%。其中负贡献站点数量仅有 4 个,分别出现在洮南、前郭、辉南和珲春,且均不超过-1.50 mm/a。水汽压差对蒸发量变化的正贡献变化范围为 0~5.52 mm/a。其中正贡献高值区出现在吉林省的西部和中部,且贡献值大于 4 mm/a;正贡献值为 2.0~4.0 mm/a 的站点,在全省范围内均有分布;正贡献为 0~2.0 mm/a 的站点数最多,共有 18 个,主要在吉林省的中部和东南部。不同季节中水汽压差对 E_{pan} 变化的贡献也多呈正贡献(表 4)。但不同季节中,正、负贡献的空间分布存在一定差异。春季水汽压差对吉林省蒸发皿蒸发量的平均贡献为 0.51 mm/a。与全年相比,春季负贡献站点数略有增加,但贡献值较小,均小于-1 mm/a。贡献负值区主要出现在中部的辽源和南部的通化地区,西部地区在春季并不存在负贡献的站点。这可能与吉林西部春季干燥,易出现春旱,空气湿度低水汽压差大有关。夏季水汽压差的

平均贡献为 1.32 mm/a,正贡献的站点有 44 个,仅长岭站表现为负贡献,为-0.29 mm/a。秋季水汽压差对全省蒸发的平均贡献为 0.75 mm/a,45 个站点均为正贡献。冬季全省有两个站点为负贡献,分别是前郭和珲春,但负贡献值均不超过-0.05 mm/a,水汽压差的平均贡献为 0.25 mm/a。分析结果显示水汽压差对年、季蒸发皿蒸发量的变化多为正贡献,即水汽压差增加导致大气干燥,进而促进了蒸发皿蒸发量的增加。

日照时数对吉林省蒸发量年变化的平均贡献为-0.93 mm/a,日照时数下降是指证吉林省 E_{pan} 减小的另一个指标。从空间分布上来看,日照时数负贡献的站点有 35 个,占总数的 77%。负贡献值高值区集中在吉林中部地区,其值在-5.0~-2.5 mm/a,共有 4 个站点。其余站点负贡献值为-2.5~0 mm/a。贡献为正的站点数量有 10 个,且正贡献值均小于 0.5 mm/a。在全省范围内自西向东零星分布,并无明显的分布特点。四季中,日照时数平均贡献呈由负转正的变化趋势(表 4)。其中春季日照时数下降明显,其负贡献强,为-0.95 mm/a。且影响范围较全年略有增加,负贡献的站点数有 44 个,仅伊通站为正贡献。而夏、秋两季中日照时数贡献的空间分布形式同年变化情况基本一致,只是负贡献绝对值大小有所下降,分别为-0.57, -0.20 mm/a。冬季则恰好相反,日照时数正贡献影响的站点数和作用强度均有所加强,正贡献的站点数增加到 28 个,同时冬季吉林省日照时数对 E_{pan} 变化的

平均贡献由负转正,平均贡献为 0.03 mm/a。

综上分析发现,由于吉林省不同地区之间影响蒸发变化的气象因子的空间分布不均匀。进而使得同一气象要素对蒸发皿蒸发量变化贡献的大小在不同的时间和空间上的分布都存在一定差异。

通过通径分析发现(表 5),直接通径系数显示风速对年蒸发的直接作用最大,为 0.79,其后依次为水汽压差、日照时数、气温,这与之前依据定量化估算模型分解的结果一致。间接通径系数显示,年平均气温主要通过水汽压差和风速对年蒸发产生间接作用;风速则通过水汽压差对年蒸发变化的负间接作用最大;日照时数和水汽压差则主要是通过风速对年蒸发产生影响。四季中,直接通径系数结果与之前的贡献分析结果基本吻合。分析间接通径系数显示,春季中气温主要水汽压差对蒸发产生影响,其他要素的间接通径系数则较小,对春季蒸发变化的影响不大。夏季中,气温和日照时数通过水汽压差对夏季蒸发产生影响,其他要素的间接影响并不明显。秋季中,气温和风速通过水汽压差间接影响秋季蒸发变化,其他要素对蒸发则没有明显的间接影响。冬季中除了气温通过水汽压差对蒸发产生较大的间接影响以外,其他要素的间接影响并不明显。

表 5 蒸发皿蒸发量与各气象因子的通径系数

| 时间 尺度 | 气象 要素 | 直接通径 系数 | 间接通径系数 | | | |
|----------|----------|------------|--------|-------|-------|-------|
| | | | 气温 | 风速 | 日照时数 | 水汽压差 |
| 全年 | 气温 | 0.27 | — | −0.49 | −0.08 | 0.50 |
| | 风速 | 0.79 | −0.22 | — | 0.16 | −0.46 |
| | 日照时数 | 0.32 | −0.10 | 0.41 | — | −0.05 |
| | 水汽压差 | 0.70 | 0.20 | −0.41 | −0.02 | — |
| 春季 | 气温 | 0.07 | — | −0.20 | 0.01 | 0.56 |
| | 风速 | 0.68 | −0.02 | — | 0.07 | −0.13 |
| | 日照时数 | 0.11 | 0.01 | 0.37 | — | 0.18 |
| | 水汽压差 | 0.62 | 0.06 | −0.11 | 0.03 | — |
| 夏季 | 气温 | 0.04 | — | −0.05 | 0.10 | 0.45 |
| | 风速 | 0.17 | −0.01 | — | 0.13 | −0.10 |
| | 日照时数 | 0.32 | 0.01 | 0.07 | — | 0.39 |
| | 水汽压差 | 0.69 | 0.03 | −0.02 | 0.18 | — |
| 秋季 | 气温 | 0.05 | — | −0.10 | 0.01 | 0.49 |
| | 风速 | 0.24 | −0.02 | — | 0.11 | −0.41 |
| | 日照时数 | 0.31 | 0.01 | 0.08 | — | 0.12 |
| | 水汽压差 | 0.84 | 0.03 | −0.12 | 0.05 | — |
| 冬季 | 气温 | 0.36 | — | −0.05 | −0.04 | 0.57 |
| | 风速 | 0.21 | −0.08 | — | 0.06 | −0.27 |
| | 日照时数 | 0.13 | −0.11 | 0.09 | — | −0.24 |
| | 水汽压差 | 0.72 | 0.29 | −0.08 | −0.04 | — |

注:“—”代表未发现。

3.3 影响吉林省蒸发皿蒸发量变化主导因子的变化趋势

通过以上分析发现各气象因子对不同地区之间

蒸发量变化的贡献不同,进一步对比各气象要素对蒸发皿蒸发量贡献绝对值的大小,从中判断影响蒸发变化的主导因子。影响吉林省 E_{pan} 年变化的气象因子主要有:气温、风速、水汽压差和日照时数,各因子的年平均贡献分别为:0.84, −1.77, 1.64, −0.93 mm/a。风速和日照时数的贡献多为负贡献,而且研究发现过去 45 a 中年平均风速和年总日照时数呈显著下降的趋势,即上述两个气候因子的减小引起吉林省蒸发量下降。分析气温和水汽压差在过去 45 a 中呈显著增加的趋势,且两者的贡献则多为正贡献,即上述两个因子的增加引起蒸发量上升。4 个气象因子的贡献中,风速贡献的绝对值最大,因此判断风速是影响蒸发量下降的主导因素。由于风速、日照时数总的负贡献大于气温、水汽压差总的正贡献,虽有部分负贡献被抵消,但是总贡献值仍为 −0.22 mm/a。各气象要素的总贡献为负,这与吉林省地区蒸发量下降的年变化趋势相一致。过去 45 a 中,四季的风速、日照时数呈不同程度的下降,而气温和水汽压差则呈增加趋势。春季 E_{pan} 的变化形式与年变化形式相似,主导春季蒸发变化的因素为风速的负贡献,及春季风速下降是影响蒸发变化的主要因子,而且各要素的总贡献也为负。在夏、秋、冬三季中全省的 E_{pan} 出现不同程度的增加,但其趋势并不显著。分析 3 个季节中影响蒸发量变化的主导因子分布发现,3 个季节中蒸发量的变化主要是受到水汽压差和气温正贡献影响。虽然 3 个季节中风速、日照时数的负贡献和水汽压差、气温的正贡献均出现下降。但正贡献下降幅度要小于负贡献,且冬季的日照时数也由负转为弱的正贡献,3 个季节蒸发量总体上受正贡献影响。不过由于大部分正贡献被负贡献抵消,使得总的贡献值虽然为正,但绝对值不大。受此影响 3 个季节中 E_{pan} 虽有增加但趋势并不显著。

空间上来看,吉林地区地形和气候的多样性使得影响年、季蒸发皿蒸发量变化的主导因子在空间上存在明显的差异(图 5)。吉林省东高西低,自西向东可分为平原—丘陵—山地三大地貌,西部地区临近科尔沁沙地,为半干旱区。同时西部地区为农牧交错带,该地区生态环境脆弱同时对于外界的变化十分敏感。西部地区降水少,大风日数多,大风的变化是影响蒸发变化的主要因子。西部地区中的蒸发皿蒸发量多为下降的变化趋势,其中多数站点中风速负贡献是影响西部地区蒸发变化的主导因子。而东部山区地处湿润区,气候多受长白山脉影响。20 世纪 80 年代以后,全球变暖气温上升导致气候暖干化,东部地区空气中的水汽含量减少,水汽压差增大促进蒸发的变

化,进而使其正贡献值超过其他气象因子成为影响吉林东部地区 E_{pan} 年变化的主导因子,所以南部部分站点的 E_{pan} 呈微弱增加的趋势。与年变化相似,春季的 E_{pan} 也呈下降趋势。风速和日照时数的负贡献是影响蒸发变化的主导因子,仅在西部地区的个别站点主导因子为气温和水汽压差的正贡献。夏、秋、冬 3 个季节中影响 E_{pan} 变化的主导因子为水汽压差的正贡献,且 3 个季节中主导因子空间分布特征相似,只是正贡献强度和站点数量上存在不同。其中夏季水汽压差的正贡献影响的区域由春季的东部山区向西扩大到了中部地区,而在秋季水汽压差的正贡献影响的面积则进一步向西部地区扩大。冬季影响全省 E_{pan} 变化的主导因子仍是水汽压差的正贡献,只是受影响站点的数量相较秋季略有下降。

4 讨论

蒸发皿蒸发量是表征大气干湿程度和大气蒸发潜力的重要指标,本研究通过研究吉林省地区过去 45 a 的观测结果发现蒸发皿蒸发量呈下降的变化趋势。太阳辐射和风速的减小导致蒸发量下降,水汽压差的增大和气温升高导致蒸发量增大。所以需要进一步分析气象因子的变化对吉林省蒸发皿蒸发量变化的影响。

本研究使用日照时数作为表征太阳辐射大小的数据,发现日照时数随着时间呈下降的趋势且对蒸发皿蒸发的变化呈负贡献。相关研究也指出,本地区日照时数显著减少,平均每 10 a 减少 53.9 h^[28]。究其原因低云量增加是导致吉林省地区日照时数减少的主要气象因素。另外吉林省经济发展和城市化进程导致大气污染物排放量增加,大气中污染物不断累积,气溶胶光学厚度不断增加,使得雾霾天气日数增加。低云量和大气中污染物的增加不但会减少昼间地面接收到的太阳辐射能,还会进一步导致日照时数的减少。而且此外,除了低云量和大气污染物浓度直接导致日照时数减少外,云和大气污染物之间还存在相互作用,如云量与气溶胶粒子浓度变化有关^[29],气溶胶不但会促使云量增多,云滴浓度增大,还会增加云对太阳辐射的反照率。

风速对吉林省地区蒸发皿蒸发量的变化是负贡献,且其负贡献的绝对值最大,即风速下降是引起蒸发皿蒸发量下降的主要原因,尤其是在吉林省的西部和中部地区。风速作为蒸发扩散过程中的动力因子,风速大小决定了蒸发过程中水汽向外的扩散能力的大小。相关研究表明过去 50 a 中纬度大部分地区的近地面风速呈下降的趋势,吉林省 1975—2012 年风速下降了 0.21 ms/10 a,高于全国平均值^[30]。风速

下降主要受环流形式和下垫面性质改变影响。极地冷空气的范围和势力趋于减弱,副热带系统影响范围偏北,中纬度西风带环流经向度减弱,这些环流因子的变化都会导致本地区风速的下降。此外,城市化的发展导致下垫面性质改变,阻力增大,也是近地层风速减小的主要原因之一。

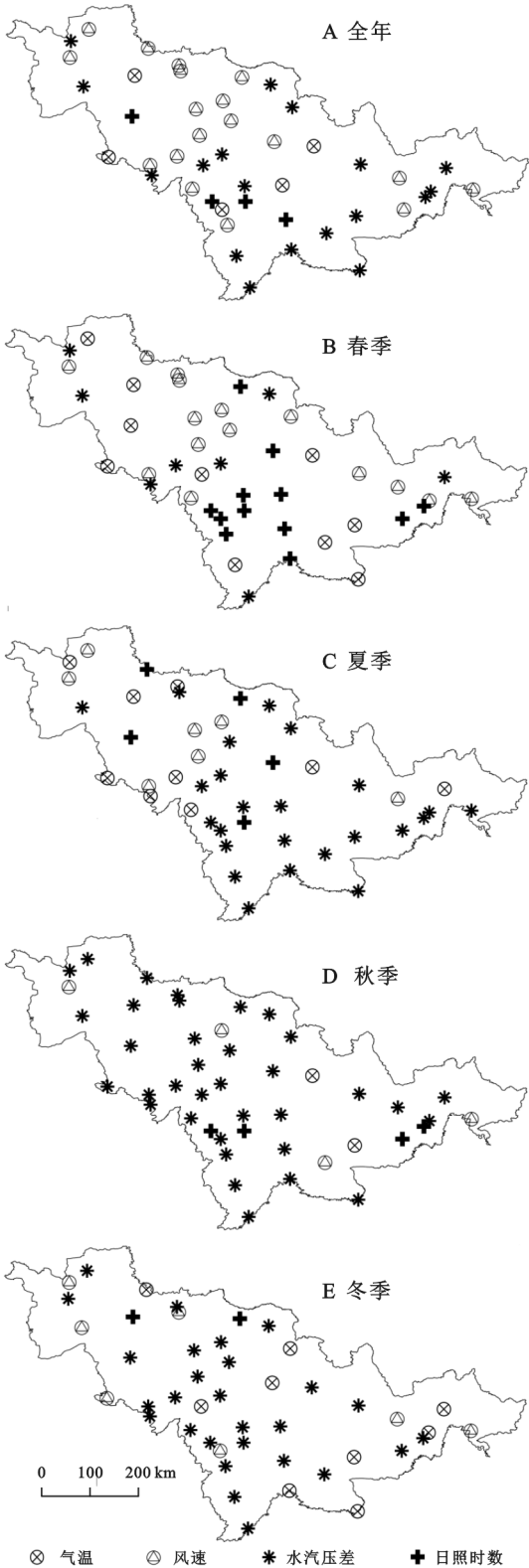


图 5 吉林省地区蒸发皿蒸发量变化主导因子的空间分布

吉林省地区气温在过去 45 a 中为蒸发皿蒸发量变化提供正贡献,即气温的增加促进蒸发皿蒸发量的变化。但是气温仅是影响蒸发变化的一个因子,蒸发的变化是气温、气压、风速、湿度多因素综合作用的结果。结合本研究结果来看,吉林省风速和日照时数的负贡献超过了气温和水汽压差的正贡献,才导致气候变暖背景下蒸发量却呈现出下降的趋势,出现“蒸发悖论”现象。分析发现,吉林省蒸发量下降是各气象因子共同作用的结果,而“蒸发悖论”则是孤立地看待气温对蒸发皿蒸发量变化的正贡献,忽略其他气象因子变化对蒸发皿蒸发量的贡献而得到的结果。

水汽压差是指特定温度下,饱和水汽压与实际水汽压的差值。其数值的大小表示的是实际空气距离水汽饱和和状态的程度,综合反映了气温和相对湿度对大气干燥程度的影响。常用于表征某地区大气的湿润或干燥程度,可以反映出气温和相对湿度对蒸发的影响,其大小的变化与大气干湿状况的变化密切相关。气候变暖背景下,由于受到降水减少和气温升高的影响,东北地区干旱化的趋势正在加剧^[31-33]。从本文的研究结果来看,水汽压差对于吉林省地区蒸发皿蒸发量变化为正贡献,这与东北地区气候暖干化的变化趋势一致^[34]。说明由于吉林省地区干旱化趋势使得空气中的水分减少,大气变得“更干”,加大了水汽压差。作为反馈,水汽压差的增大则进一步促进蒸发量的增加,尤其是在夏、秋、冬 3 个蒸发皿蒸发量微弱增加的季节中,水汽压差的正贡献是影响蒸发量变化的主导因子。

5 结论

(1) 45 年来,吉林省蒸发皿蒸发量的年变化趋势呈显著下降,其速率为 $-22.49 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。其中春季蒸发量下降速率最大,为 $-29.02 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。而在夏季、秋季、冬季吉林省蒸发皿蒸发量虽有小幅上升,但这种上升趋势并不显著。

(2) 全省平均状态下,45 a 中影响蒸发皿蒸发量变化的主要因子是风速,水汽压差次之,而气温和日照时数的作用小于前两者。风速和日照时数的负贡献超过气温和水汽压差的正贡献,导致近 45 a 蒸发皿蒸发量呈下降趋势。

(3) 四季中春季蒸发量出现下降,风速是影响其变化的主要因素,水汽压差次之。夏、秋、冬三季节中蒸发皿蒸发量呈弱增加趋势,水汽压差的正贡献成为影响三季节中蒸发皿蒸发量变化的主导因子。

(4) 空间上来看,影响吉林西部和中部地区的年蒸发量变化的主导因子是风速和日照时数,南部的主导因子是水汽压差。四季中,春季风速和日照时数成

为影响多数气象站蒸发变化的主导因子,仅在西部个别站点主导因子为气温和水汽压差。其他季节中水汽压差增加是影响多数气象站蒸发量变化的主导因子,且空间分布特征相似,只是在正贡献的强度和站点数量上存在不同。

参考文献:

- [1] IPCC: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [J]. Computational Geometry, 2013, 18(2): 95-123.
- [2] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377(6551): 687-688.
- [3] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, 24(9): 1077-1090.
- [4] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s[J]. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 2005, 25(15): 2031-2039.
- [5] Michael L R, Graham D F. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298(15): 1410-1411.
- [6] 左洪超,李栋梁,胡隐樵,等.近 40 a 中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J].科学通报, 2005(11): 1125-1130.
- [7] 曾燕,邱新法,刘昌明,等.1960—2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J].水科学进展, 2007, 18(3): 311-318.
- [8] 刘波,马柱国,丁裕国.中国北方近 45 年蒸发变化的特征及与环境的关系[J].高原气象, 2006, 25(5): 840-848.
- [9] 申双和,盛琼.45 年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J].气象学报, 2008, 66(3): 452-460.
- [10] 刘敏,沈彦俊,曾燕,等.近 50 年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J].地理学报, 2009, 64(3): 259-269.
- [11] 高国栋,陆渝蓉,李怀瑾.我国陆面蒸发量和蒸发耗热量的研究[J].气象学报, 1980, 38(2): 165-176.
- [12] Golubev V S, Lawrimore J H, Groisman P Y, et al. Evaporation changes over the contiguous United States and the former USSR: A reassessment [J]. Geophysical Research Letters, 2001, 28(13): 2665-2668.
- [13] Walter M T, Wilks D S, Parlange J Y, et al. Increasing evapotranspiration from the conterminous United States[J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(3): 405-408.
- [14] Hobbins, Michael T. Trends in pan evaporation and actual evapotranspiration across the conterminous U.S.: Paradoxical or complementary[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(13): 405-407.

由于该时期降雨量偏大,尤其是汛期雨量为各时期最大值,故天然产沙量较多,且 1980 年以后流域水利水保工程及坡面水土保持措施量增幅缓慢,前期坝库已严重淤积,拦沙作用有限;2010—2015 年的来沙量最少,主要原因为汛期雨量偏小,自 2000 年以来流域开展了较大规模的淤地坝与水土保持坡面措施建设,同期建成水库 10 余座,沟道工程拦沙及水保坡面措施减沙作用均大幅增加。

(3) 清水河流域自开展坡面水土流失治理以来,治理成效逐渐显现。2000 年以来,各项坡面水土保持措施减沙量及淤地坝拦沙量均呈较快增大趋势,其中人工林与封禁治理的成效尤为显著。

参考文献:

- [1] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J].水利学报,2018,49(9):1028-1039.
- [2] 姚文艺,高亚军,安催花,等.百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析[J].水利水电科技进展,2015,35(5):112-120.
- [3] Yao W Y, Xiao P Q, Shen Z Z, et al. Analysis of the contribution of multiple factors to the recent decrease in discharge and sediment yield in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9):1289-1304.
- [4] 鲁俊,安催花,吴晓杨.黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].泥沙研究,2018,43(6):40-46.
- [5] 姚文艺,侯素珍,丁赞.龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J].水科学进展,2017,28(1):1-13.
- [6] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [7] 包淑萍,王生鑫.清水河流域水沙变化分析[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [8] 汪岗,范昭.黄河水沙变化研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [9] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等.黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [10] 杨吉山,张晓华,宋天华,等.宁夏清水河流域水库拦沙量分析[J].水土保持学报,2019,33(6):170-174.
- [11] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396(6706):30.
- [12] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2001,107(4):255-278.
- [13] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964—1998[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,111(2):83-91.
- [14] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997,87(1):55-73.
- [15] Cohen S, Stanhill G. Evaporative climate changes at BetDagan, Israel, 1964—1998 [J]. Agri Forest Meteor, 2002,111(2):83-91.
- [16] Zuo H C, Li D L, Hu Y Q. Climate change trendand its relationship to change of pan evaporation in China in recent 40 years[J]. Chinese Sci Bull, 2005, 50(11): 1125-1130.
- [17] 邱新法,刘昌明,曾燕.黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J].自然资源学报,2003,18(4):437-447.
- [18] 郭军,任国玉.黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J].水科学进展,2005,16(5):666-672.
- [19] 韩松俊,刘群昌,杨书君.黑河流域上中下游潜在蒸散发变化及其影响因素的差异[J].武汉大学学报:工学版,2009,29(6):734-737.
- [20] 王艳君,姜彤,许崇育.长江流域 20 cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J].水科学进展,2006,17(6):830-833.
- [21] 罗玉峰,缴锡云,彭世彰,等.海河流域参考作物腾发量长期变化趋势分析[J].灌溉排水学报,2009,28(1):10-13.
- [22] 廉毅,安刚,王琪,等.吉林省 40 年来气温和降水的变化[J].应用气象学报,1997,8(2):197-204.
- [23] 任芝花,黎明琴,张纬敏.小型蒸发器对 E2601B 蒸发器的折算系数[J].应用气象学报,2002,13(4):508-512.
- [24] 刘玉英,韦小丽,李宇凡.1961—2012 年吉林省日照时数的变化特征及影响因素[J].自然资源学报,2015,30(8):1367-1377.
- [25] 施晓晖,徐祥德,谢立安.暖季中国东部气溶胶“影响显著区”的气候变化特征[J].中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(4):519-528.
- [26] 谢今范,刘玉英,李宇凡.吉林地面和高空风速变化特征及成因分析[J].高原气象,2015,34(5):1424-1434.
- [27] 王亚平,黄耀,张稳.中国东北三省 1960—2005 年地表干燥度变化趋势[J].地球科学进展,2008,23(6):619-627.
- [28] 孙力,沈柏竹,安刚.中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析[J].应用气象学报,2003,14(5):542-552.
- [29] 马柱国,符淙斌.中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J].气象学报,2001,59(6):737-746.
- [30] 赵福年,赵铭,王莺,等.石羊河流域 1960—2009 年参考蒸散量与蒸发皿蒸发量变化特征[J].干旱气象 2014,32(4):560-568.

(上接第 183 页)