

四川省土壤水分状况空间分布特征^①

翁倩, 袁大刚*, 张楚, 宋易高, 付宏阳, 陈剑科, 李启权, 王昌全

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 土壤水分状况(SMR)是确定土壤分类单元的重要依据,也是土壤资源可持续利用的保证。基于 1951—1980 年四川省 160 个气象站的地面气候资料,利用 FAO-56 Penman-Monteith 公式和 FAO-PPP-17 Penman 修正公式计算各个站点年/月潜在蒸散量和干燥度(I_A),采用地统计学原理与普通 Kriging 法对年/月 I_A 进行空间插值,依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》中有关 SMR 的规定,对四川省可能的 SMR 空间分布特征进行分析。结果表明:四川省 SMR 区域差异明显,整体呈现“东湿西干”的空间分布特征;以“湿润”和“半干润”为主,湿润主要分布于四川盆地,“半干润”主要分布在川西南山地及川西北高山高原地区;“常湿润”分布在宜宾部分区域,川西北德荣南部为“干旱”。本研究为四川省土壤系统分类与土壤资源的可持续利用提供了科学依据。

关键词: 土壤水分状况;土壤系统分类;干燥度;四川省

中图分类号: S155 文献标识码: A

土壤水分状况(SMR)是土壤系统分类中重要的诊断特性,成为土壤类型划分的重要依据^[1-2];是影响植物生长发育和作物产量的重要因子^[3],在评价土壤质量中有重要地位^[4-5]。由于土壤水分本身观测资料的限制,SMR 的确定常借助于气候资料建立数学模型来间接估算。杨学明^[6]利用修订的 Thornthwaite 公式计算潜在蒸散量(ET_0)并确定其他参数后,再根据美国土壤系统分类与南京土壤所对 SMR 确定的原则,对吉林省 SMR 进行了等级划分;张学雷等^[7]利用 Newhall Simulation Model(NSM)模型对山东省 SMR 进行了等级划分;潘静娴等^[8]利用改进的 NSM 模型对新疆地区也进行了 SMR 的等级划分;陈健飞^[9]将气象站蒸发器实测值折算后得出年干燥度(I_A),再按照中国土壤系统分类的标准划分了福建省 SMR 等级;曹祥会等^[5]通过修正的谢尔尼诺夫公式,按照《中国综合自然区划》中的划分指标间接划分了河北省土壤干湿状况等级。

中国土壤系统分类中的 SMR 等级主要依据 Penman 经验公式计算的 ET_0 与降水量之比,即 I_A 来确定。因此, ET_0 的准确计算对确定 SMR 显得尤为重要。FAO-PPP-17 Penman 修正公式^[10]和 FAO-56 Penman-Monteith 公式^[11]所需参数多、精度高,被公

认为是计算 ET_0 较好的方法^[12-13],其中 FAO-56 Penman-Monteith 公式是当前 FAO 推荐计算 ET_0 的标准方法^[11]。于东升等^[4]根据改进的 Penman 公式估算了我国的年 I_A ,依据《中国土壤系统分类(修订方案)》将我国初步划分为湿润、半干润和干旱 3 个 SMR 区;由于缺乏各月 I_A 资料,其不足之处是对实际存在的“常湿润”无法进行区分。苏秀程等^[14]基于 Penman-Monteith 公式计算 ET_0 与湿润指数,并结合 ArcGIS 反距离加权插值法分析了近 50 年来中国西南地区地表干湿状况时空变化特征及空间差异^[15];赵璐等^[16]利用四川省 1960—2010 年 45 个站点逐月数据,采用 Penman-Monteith 公式并基于云模型研究了四川省 ET_0 的时空分布特征;吴侯^[3]也仅利用四川省部分县区的土壤湿度测定结果简要分析了四川省土壤水分(贮水量)时空变化规律,这些学者均未进一步计算 I_A ,并根据中国土壤系统分类要求探讨四川省 SMR。因此,本文依据四川省 160 个气象站的地面气候资料,通过对比 FAO-PPP-17 Penman 修正式与 FAO-56 Penman-Monteith 公式计算的年均和月均 ET_0 及进一步得到的年均和月均 I_A ,依据《中国土壤系统分类检索(第三版)》^[2]中有关“常湿润”、“湿润”、“半干润”、“干旱”的定义,结合地统计学知识与 ArcGIS 分析

基金项目: 国家科技基础性工作专项(2014FY110200A12)和国家自然科学基金项目(41671218)资助。

* 通讯作者(690654034@qq.com)

作者简介: 翁倩(1993—),女,四川内江人,硕士研究生,主要从事土壤资源可持续利用研究。E-mail: gyqr1234@163.com

技术，确定四川省 SMR 可能等级并分析其空间分布特征，为四川省土壤系统分类与土壤资源可持续利用奠定基础。

1 材料与方 法

1.1 数据来源

本文采用四川省地面气候资料(1951—1980 年)中阿坝、成都、达州、攀枝花、凉山、甘孜、乐山、绵阳、雅安、宜宾、南充、自贡、内江等地共计 160 个气象站(图 1)的海拔、经纬度、年均和月均气温、气压、相对湿度、风速、降水量、蒸发量、日照百分率等指标，开展四川省 SMR 空间分布特征研究。

1.2 研究方法

1.2.1 潜在蒸散量计算方法 1)FAO-PPP-17 Penman 修正公式。采用联合国粮农组织(FAO)1979

$$ET_0 = \frac{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} \left[0.75R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) - \sigma T_K^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_d}) \left(0.10 + 0.90 \frac{n}{N} \right) \right] + 0.26(e_s - e_d)(1.00 + C u_2)}{\frac{P_0}{P} \frac{\Delta}{\gamma} + 1.00} \quad (1)$$

式中：ET₀为潜在蒸散量(mm)；R_a为大气上界的太阳辐射量(mm/d)； $\frac{n}{N}$ 为日照百分率；a、b为根据日照时数估算太阳总辐射的系数，本文参照祝昌汉^[17]所列分区值，甘孜、阿坝、凉山州选择青藏高原区值(a=0.183，b=0.681)，其他地区选择东部湿润区值(a=0.136，b=0.602)； σT_K^4 为气温 T_K时的黑体辐射，化为蒸发当量(mm)，T_K为绝对温标 T_K=273+t°，σ为 Stefan-Boltzmann 常数=2.01×10⁻⁹ mm/(d°C⁴)；e_s与 e_d分别为饱和水汽压与实际水汽压(mb)；u₂为距地面 2 m 高的平均风速(m/s)；C 为风速系数，其取值如表 1^[10]；Δ为饱和水汽压曲线在 T=Ta 处的斜率(mb/°C)；γ为干湿表常数 0.66；P₀与 P 分别为海平面平均气压与本站平均气压(mb)。

表 1 风速系数^[10]

Table 1 The coefficient affecting the wind speed at 2 m above the ground

月平均最低气温	月平均最高温度与最低温度间温差	风速系数
-	$\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \leq 12^\circ C$	0.54
>5°C	$12 < \bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \leq 13^\circ C$	0.61
>5°C	$13 < \bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \leq 14^\circ C$	0.68
>5°C	$14 < \bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \leq 15^\circ C$	0.75
>5°C	$15 < \bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \leq 16^\circ C$	0.82
>5°C	$\bar{T}_{max} - \bar{T}_{min} \geq 16^\circ C$	0.89

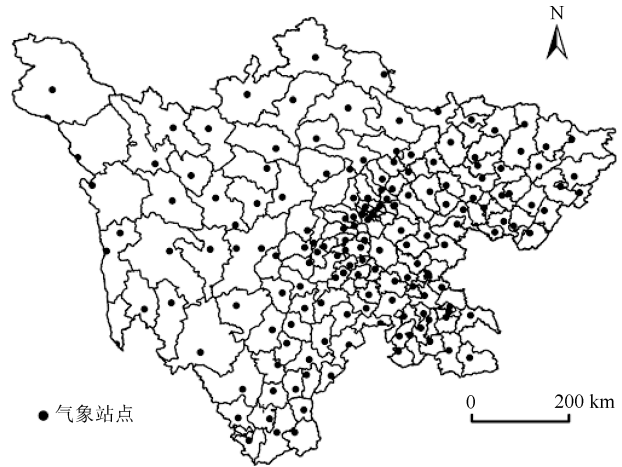


图 1 四川省气象站点分布

Fig.1 Spatial distribution of weather observation stations in Sichuan Province

年修订的 Penman 公式^[10]估算参考作物蒸散量，下文简称 Penman 公式，表达如下：

2)FAO-56 Penman-Monteith 公式。采用联合国粮农组织(FAO)1998 年修订的 Penman-Monteith 公式^[11]估算参考作物蒸散量，下文简称 Penman-Monteith 公式，表达如下：

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 U_2)} \quad (2)$$

式中：ET₀为潜在蒸散量(mm)；R_n为净辐射(MJ/(m²d))；G为土壤热通量(MJ/(m²d))；T为平均气温(°C)；U₂为距地面 2 m 高的平均风速(m/s)；e_s与 e_a分别为饱和水汽压与实际水汽压(kPa)；Δ为饱和水汽压曲线在 T=Ta 处的斜率(kPa/°C)；γ为干湿表常数(kPa/°C)。其中各参数计算如下：

$$U_2 = U_h \frac{4.87}{\ln(67.8h - 5.42)} \quad (3)$$

式中：U_h为 10 m 高度处风速(m/s)，h=10。气象站 2 m 的风速可用上式转换得到。

$$G_{mon,i} = 0.14 (T_{mon,i} - T_{mon,i-1}) \quad (4)$$

式中：T_{mon,i}、T_{mon,i-1}分别为第 i 月、第 i-1 的平均气温(°C)。土壤热通量 G 在月的时间尺度上需要根据平均气温计算。

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 \times T_{mean}}{T_{mean} + 237.3} \right) \right]}{(T_{mean} + 237.3)^2} \quad (5)$$

式中： Δ 为饱和水汽压曲线斜率； T_{mean} 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

$$\gamma = \frac{C_p P}{\epsilon \lambda} = 0.000\ 665 P \tag{6}$$

式中： γ 为干湿表常数； λ 为蒸发的潜热系数(MJ/kg)，取值 2.45； ϵ 为水蒸气和干空气的分子重量比，为 0.622； C_p 是标准大气压下的特定热量值(MJ/(kg $^{\circ}\text{C}$))，为 1.013×10^{-3} ； P 为大气压(kPa)。

$$e_s = \frac{e(T_{max}) + e(T_{min})}{2} \tag{7}$$

式中： e_s 为饱和水汽压； $e(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right]$ ， T_{max} 、 T_{min} 分别为最高、最低绝对气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

$$e_a = \frac{RH_{mean} \left[\frac{e(T_{min}) + e(T_{max})}{2} \right]}{100} \tag{8}$$

式中： e_a 为实际水汽压； RH_{mean} 是相对湿度(%)。

$$R_n = (1 - \alpha) \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_{so} - \sigma \left(\frac{T_{min}^4 - T_{max}^4}{2} \right) \tag{9}$$

$$\left(0.56 - 0.08 \sqrt{e_s} \right) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right)$$

式中： σ 为 Stefan-Boltzmann 常数，取值 4.903×10^{-9} (MJ/(K $^4\text{m}^2\text{d}$))； T_{min} 和 T_{max} 分别为绝对温标的最低、最高温度(K)； a 、 b 为根据日照时数估算太阳总辐射的系数，取值与 Penman 公式中所用相同； R_{so} 为晴天辐射(MJ/m 2)； α 为地表反射度，取值 0.23。其中晴天辐射的计算公式为：

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} h) R_a \tag{10}$$

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r \left[(\omega_s \sin \varphi \sin \delta) + (\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \right] \tag{11}$$

式中： R_a 为天文辐射； G_{sc} 为太阳常数(MJ/(m ^2min)) 取值为 0.0820， d_r 为日地距离(m)； ω_s 为日落时角(rad)； φ 为纬度(rad)； δ 为太阳高度角(rad)。其中 $\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)]$ ， $d_r = 1 + 0.033 \cos\left[\frac{2\pi}{365} J\right]$ ， $\delta = 0.409 \sin\left[\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right]$ 。

公式中单位的换算：Kelvin ($^{\circ}\text{K}$) = ($^{\circ}\text{C}$) + 273.16；1 millibar (mbar) = 0.1 kPa；1 bar = 100 kPa；1 mm/d = 2.45 MJ/(m $^2\cdot\text{d}$)。

1.2.2 气候干燥度计算与土壤水分状况的划分 通过计算出的 ET_0 与各气象站点获得的降水量来计算 I_A ，再依据 I_A 来划分 SMR 可能等级。 I_A 计算公式为：

$$I_A = \frac{ET_0}{P} \tag{12}$$

式中： I_A 为干燥度； ET_0 为潜在蒸散量(mm)； P 为降

水量(mm)。

SMR 按《中国土壤系统分类检索(第三版)》^[2] 由 Penman 经验公式计算的 I_A 估算“常湿润”(年 $I_A < 1$ ，而且每月计 I_A 几乎都 < 1)、“湿润”(年 $I_A < 1$ ，但每月 I_A 并不都 < 1)、“半干旱”(1 $<$ 年 $I_A < 3.5$)和“干旱”(年 $I_A > 3.5$)。本文中 11 个月或 12 个月的 I_A 都 < 1 的划为“常湿润”。

1.2.3 数据处理 利用 Excel 与 SPSS 进行数据录入，结合蒸发皿观测值统计检验 ET_0 计算模型的优劣；采用 GS+对年均和月均 I_A 进行半方差函数模拟，选择适宜的半方差函数理论模型，使用 ArcGIS 中的 Kriging 空间插值技术进行叠加分析。

利用 I_A 空间插值结果与气象站点原始计算值的平均绝对误差(MAE)和均方根误差(RMSE)来检验预测结果的准确性。平均绝对误差和均方根误差的值越小，预测结果准确性越好，其计算方法如下：

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ABS(V_{oi} - V_{pi}) \tag{13}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{oi} - V_{pi})^2} \tag{14}$$

式中： V_{oi} 是年 I_A 的实际计算数据， V_{pi} 为预测数据， n 为气象站点数量，ABS 为绝对值函数。

2 结果与讨论

2.1 四川省各气象站点潜在蒸散量和土壤水分状况的对比

2.1.1 各气象站点潜在蒸散量的对比 由 ET_0 的描述统计结果(表 2)可以看出，用 Penman-Monteith 公式和 Penman 公式计算的 160 个气象站点 ET_0 的范围分别在 509.68~1 383.40 mm 和 440.22 ~ 1 436.97 mm，两公式计算结果差值在 -70 ~ 70 mm，多年平均值分别为 842.88 mm 和 806.74 mm，均小于赵璐等^[16]基于 45 个气象站点 1960—2010 年资料利用 Penman-Monteith 公式计算的整个四川省的 ET_0 多年平均值(940.66 mm)，稍大于冯禹等^[18-19]利用 12 个气象站点 1961—2010 年的气象资料分析的四川省 ET_0 多年平均值(791 mm)和川中丘陵区平均值(761 mm)。另外，Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 的标准差与变异系数均小于 Penman 公式计算值。

气象站蒸发皿测量值也可以折算作为 ET_0 来研究区域干湿情况^[20-22]。为判断两种 Penman 改进式计算结果是否能够真实反映四川地区地表蒸散状况，将四川地区 154 个气象站点的小型蒸发皿观测数据与 Penman-Monteith 公式和 Penman 公式的计算结果进

表 2 ET₀ 的描述性统计
Table 2 Descriptive statistics of potential evapotranspiration

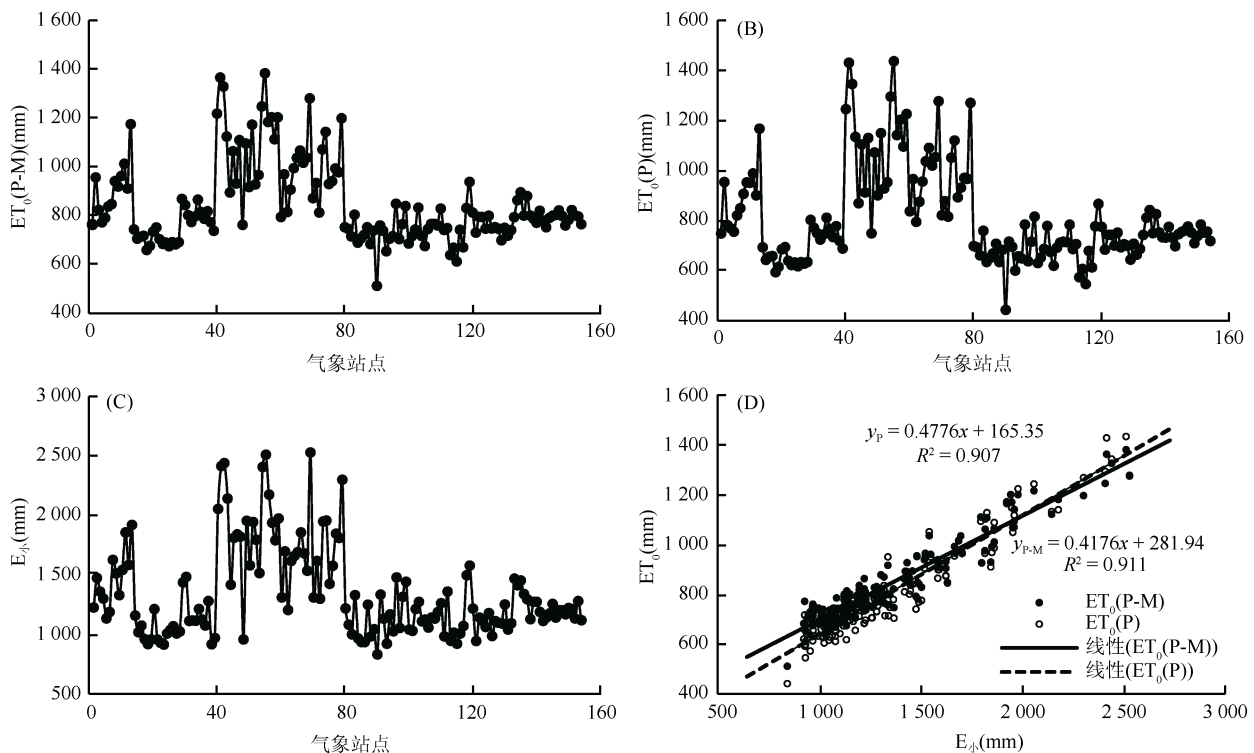
ET ₀ 类型	极小值	极大值	极差	均值	中值	标准差	变异系数
ET ₀ (P-M)	509.68	1 383.40	873.72	842.88	793.77	164.81	19.55
ET ₀ (P)	440.22	1 436.97	996.75	806.74	749.01	188.36	23.35

注：ET₀(P-M)和 ET₀(P)分别表示用 Penman-Monteith 公式和 Penman 公式计算的潜在蒸散量，下同。

行对比分析。由图 2A~C 可以看出，对应的小型蒸发皿观测值与两种公式计算得出的 ET₀ 变化趋势基本一致，但小型蒸发皿观测值远大于两公式计算值。

从表 3 看可以出，由 Penman-Monteith 公式计算得出的 ET₀ 与小型蒸发皿观测值极显著相关，相关系数为 0.954；由 Penman 公式计算得出的 ET₀ 与小型蒸发皿观测值也是极显著相关，相关系数略低，为 0.953；另外，由 Penman-Monteith 公式与 Penman 公

式计算得出的 ET₀ 之间具有极显著相关关系，相关系数为 0.995。由图 2D 也可以看出，两种计算方式下的 ET₀ 数据点离散程度较小，与小型蒸发皿观测值具有良好的线性关系，Penman-Monteith 公式计算值与蒸发皿观测值之间的回归方程式为 $y_{P-M}=0.4176x+281.94$ ，决定系数为 0.911；Penman 公式计算值与蒸发皿观测值之间的回归方程式为 $y_P=0.4776x+165.35$ ，决定系数略低，为 0.907。



注：ET₀(P-M)和 ET₀(P)分别表示用 Penman-Monteith 公式和 Penman 公式计算的潜在蒸散量；E_小为小型蒸发皿观测值。

图 2 ET₀ 与蒸发皿观测值的变化趋势

Fig. 2 The change trend of the potential evapotranspiration and pan evaporation

表 3 ET₀ 计算值与蒸发皿观测值的 Pearson 相关系数
Table 3 Pearson correlation coefficient of potential evapotranspiration and pan evaporation

	E _小	ET ₀ (P-M)	ET ₀ (P)
E _小	1	-	-
ET ₀ (P-M)	0.954**	1	-
ET ₀ (P)	0.953**	0.995**	1

注：E_小为小型蒸发皿观测值；**表示极显著相关(P<0.01)。

许多学者比较了两种 Penman 修正公式计算 ET₀ 的差异^[12-13]，分析出两者结果差异在于辐射项与空气动力学项的计算，其中蒸散量辐射项计算时影响因素多且稳定性稍差，选择不同的估算太阳总辐射的系数就会造成 ET₀ 的大幅改变。本文中两公式计算辐射项时均参照祝昌汉^[17]所列分区值参数，最终计算出的 ET₀ 差异不大，并均与蒸发皿观测值

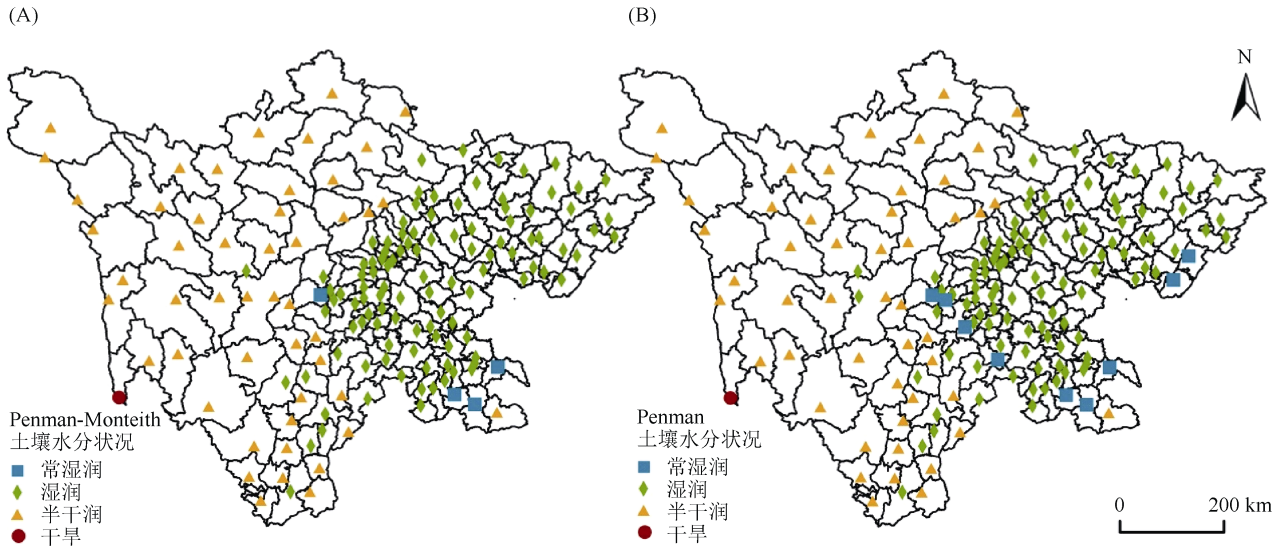


图 3 两种计算方式下各气象站点 SMR 对比

Fig. 3 Comparison of the soil moisture regimes in the weather stations under two calculation methods

具有良好的相关关系,证明利用 Penman 修正式能较好地计算 ET_0 ,能真实反映四川省整体地表蒸散状况。

2.1.2 各气象站点土壤水分状况对比 依据 Penman-Monteith 公式计算 ET_0 ,并进一步得到 I_A 划分的各气象站点 SMR,如图 3。天全、兴文、合江和叙永为“常湿润”,其中天全、兴文各月 I_A 都 < 1 ,合江、叙永只有 11 个月 $I_A < 1$;通过 Penman 公式得到的 I_A 划分 SMR 时,大竹、邻水、沐川、天全、合江、兴文、叙永、雨城、峨眉山为“常湿润”,其中,沐川、天全、兴文每月 I_A 都 < 1 ,其余各县只有 11 个月 $I_A < 1$ 。两公式计算的其他站点结果大体一致:成都、达州、绵阳、南充、内江、自贡全市,乐山、雅安、宜宾等地部分区域以及凉山州东北部为“湿润”;阿坝、攀枝花,凉山、甘孜大部分区域,雅安的汉源、石棉及泸州的古蔺为“半干润”;甘孜的得荣为“干旱”。两种计算方式划分结果主要在“常湿润”上存在差异。相较而言, Penman 公式得到的“常湿润”站点更多,除川南丘陵区域外,广安的大竹、邻水也为“常湿润”。

2.2 四川省气候干燥度与土壤水分状况的空间分布特征

2.2.1 气候干燥度的空间分布特征 从上述结果可以看出,由 Penman-Monteith 公式计算的 ET_0 变幅更小,与蒸发皿观测值的相关系数更高,回归方程决定系数更大,计算结果精度更高。并且以往学者^[23-24]对比研究中,也一致认为 Penman-Monteith 公式是计算 ET_0 最好的一种方法。因此本研究选用 Penman-

Monteith 公式计算结果为基础,通过半方差分析与普通 Kriging 插值获得年均和月均 I_A 空间分布情况。

四川省 160 个气象站的年 I_A 均值为 0.95,而月 I_A 各月差异较大,各月均值在 0.60~18.0。年、月 I_A 通过对数转换均满足正态分布。此外,从表 4 中可以看出,四川省土壤年 I_A 为指数模型,月 I_A 符合高斯-球状模型,拟合决定系数均在 0.9 以上,拟合程度较高,可以用来反映四川省年均和月均 I_A 空间变异结构特征。从拟合模型的参数可以看出,年均和月均 I_A 的变程平均为 778.29 km,空间自相关的范围较大,其块金值与基台值的比值均小于 25%,说明 I_A 具有强烈的空间自相关性。

由图 4A 可以看出,四川省年 I_A 东西部差异明显,东部地区海拔低、湿度大,年 $I_A < 1$,低值区在雅安与乐山沿岷江水系分布,年 $I_A < 0.5$;盆地最南缘的盆周山区古蔺县年 $I_A > 1$;西部地区海拔高、太阳辐射强、风速大,除越西、普格、布拖外的高原以及山地地区年 $I_A > 1$,高值区分布于乡城县与得荣县,年 $I_A > 2$ 。

2.2.2 土壤水分状况的空间分布特征 按照中国土壤系统分类检索标准^[2],对全年及各月 I_A 分布图按属性选择叠加处理,得到四川省 SMR 分布图(图 4B)。由图 4A 和图 4B 可以看出,SMR 空间分布特征与年 I_A 空间分布状况大体一致,四川省 SMR 整体呈现东湿西干的分布特征,主要包括“湿润”与“半干润”2 种,地域之间存在较大差异。四川东部平原、丘陵及盆周山地区主要为“湿润”,但其中的兴文及其与长宁、珙县交界区域为“常湿润”,古蔺县为“半干

表 4 年均和月均 I_A 的半方差函数及其拟合参数
Table 4 Semi variance function of annual and monthly I_A and its fitting parameters

I_A	模型类型	块金值	基台值	块金值/基台(%)	决定系数	变程(km)
1 月	高斯	0.260	4.230	6.1	0.995	814.063
2 月	高斯	0.133	2.276	5.8	0.984	674.287
3 月	高斯	0.090	2.180	4.1	0.993	854.421
4 月	高斯	0.043	1.624	2.6	0.991	995.582
5 月	高斯	0.034	0.681	4.9	0.991	935.307
6 月	球状	0.011	0.179	6.1	0.977	745.300
7 月	高斯	0.004	0.185	2.2	0.969	172.858
8 月	高斯	0.006	0.260	2.3	0.946	171.299
9 月	球状	0.041	0.263	15.5	0.969	1 121.000
10 月	高斯	0.069	0.771	8.9	0.979	1 036.805
11 月	高斯	0.070	2.154	3.2	0.992	844.201
12 月	高斯	0.230	2.220	10.3	0.985	616.610
全年	指数	0.010	0.287	3.5	0.954	1 136.100

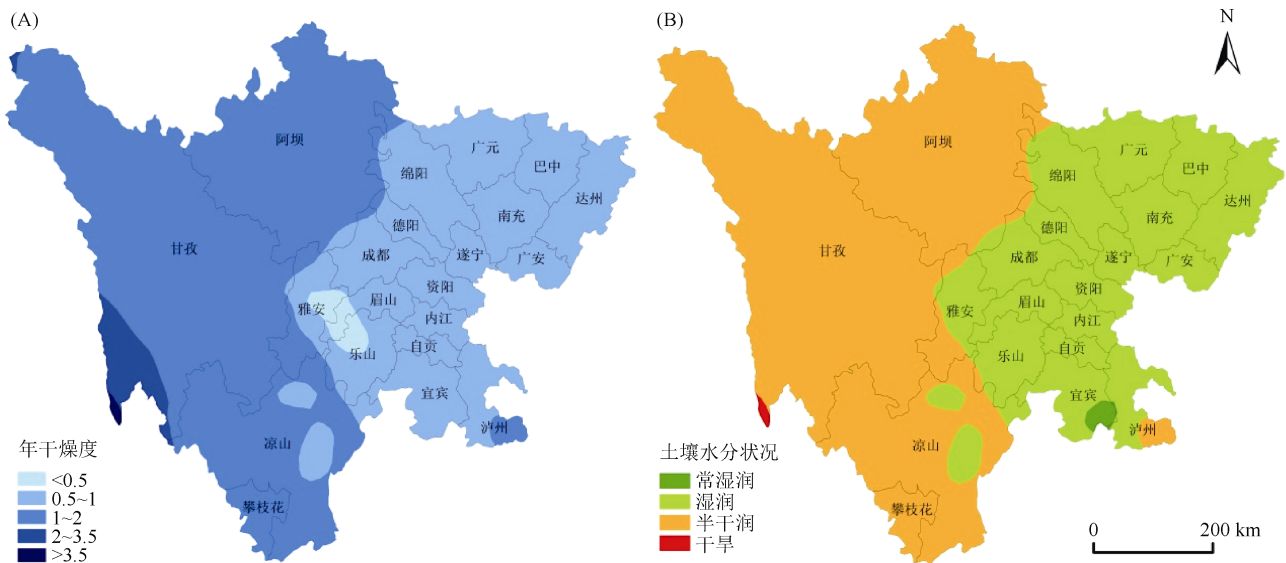


图 4 四川省年 I_A (A)与 SMR(B)空间分布
Fig. 4 The spatial distribution of annual I_A (A) and soil moisture regimes (B) in Sichuan Province

润”；雅安虽然年 $I_A < 0.5$ ，但其周围宝兴、荥经、汉源、石棉等地 12 月至 3 月 I_A 远 > 1 ，因此影响空间插值以及叠加分析结果，使得雅安即使年均 I_A 很低但仍为“湿润”。四川西部山地及高原区主要为“半干润”，而其中的越西、昭觉、普格、布拖为“湿润”，德荣县南部区域为“干旱”。

四川省地形复杂，海拔高差大，具有区域性气候，结合气候因子与地理因素综合分析，四川西部地区平均海拔较高，太阳辐射强烈，日照时间长，风速大，年均 ET_0 在 1 000 mm 左右^[14]，而年降水量平均在 700 mm 左右，年均 ET_0 远大于年均降水量，因而该区域为“半

干润”；东部平原、丘陵及盆周山地区与四川西部山地及高原区情况相反，该区域阴雨天气较多，相对湿度大，太阳辐射弱，日照时间短，风速小，年均 ET_0 约为 700 mm，年降水量则在 1 000 mm 以上，为“湿润”，其中古蔺县因地处于盆地向贵州高原过度地带，日照较充足，降水量偏少，为“半干润”。

2.2.3 插值预测结果的准确性评估 MAE 反映原始计算值与插值预测值之间的平均绝对差异，可以检验空间预测方法的效果；RMSE 衡量原始计算值与预测值之间的偏差，反映估计值的极值效应和灵敏度^[25]。四川省 160 个气象站点年 I_A 的预测值与

原始计算值的 MAE 为 0.05, RMSE 为 0.08; 各月 I_A 的预测值与实测值的 MAE 平均值为 1.56, RMSE 平均值为 4.36。各月 I_A 的预测值与实测值的 MAE 与 RMSE 差异较大, 分别在 0.04~8.66 与 0.04~30.36。其中, 在月 I_A 本身较大且各站点之间变幅很大的 12 月至 2 月, 其 MAE 与 RMSE 更高, 分别在 3.29~8.66、7.94~30.36。以上结果表明, 年 I_A 的预测效果很好, 能准确划分四川省的“湿润”、“半干润”、“干旱”等级; 但由于 12 月至 2 月 $I_A < 1$ 的站点太少, 估值精度随之下降^[26], 即 $I_A < 1$ 的区域变小, 从而导致叠加得到的“常湿润”区域面积也缩小。

3 结论

由 Penman-Monteith 公式和 Penman 公式计算出的四川省年均蒸散量分别在 509.68~1 383.40 mm 和 440.22~1 436.97 mm, 两者呈现极显著相关关系, 趋势变化具有一致性, 都能准确反映四川省整体地表蒸散状况。四川省区域之间 SMR 差异明显, 总体呈现“东湿西干”的空间分布特征; 东部平原、丘陵及盆周山地区为“湿润”, 其中兴文及其与长宁、珙县交界区域为“常湿润”; 西部山地及高原区为“半干润”; 仅德荣南部为“干旱”。

参考文献:

- [1] Soil Survey Staff. Keys to Soil Taxonomy[M]. 12th ed. Washington, DC: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2014: 29-31
- [2] 中国科学院南京土壤研究所土壤系统分类课题组, 中国土壤系统分类课题研究协作组. 中国土壤系统分类检索[M]. 3 版. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001: 61-64
- [3] 吴侯. 四川省土壤水分分布状况及其评价[J]. 北京农业大学学报, 1990, 16(S3): 90-93
- [4] 于东升, 史学正. 我国土壤水分状况的估算[J]. 自然资源学报, 1998, 13(3): 37-41
- [5] 曹祥会, 雷秋良, 龙怀玉, 等. 河北省土壤温度与干湿状况的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 528-537
- [6] 杨学明. 土壤水热状况与土壤系统分类[J]. 土壤, 1989, 21(2): 110-113
- [7] 张学雷, 肖光平, 程凤鸣. NSM 模型对山东省土壤水分和温度状况的划分[J]. 山东师大学报(自然科学版), 1994, 9(4): 93-97
- [8] 潘静娴, 常松, 钟骏平. 新疆土壤系统分类土壤温度、水分状况图的编制[J]. 土壤, 1997, 29(4): 194-199
- [9] 陈健飞. 土壤水分和温度状况的估算[J]. 土壤, 1989, 21(3): 160-162
- [10] Frère M, Popov G F. Agrometeorological crop monitoring and forecasting[M]. FAO Plant Production and Protection Paper 17, Rome, Italy, 1979: 39-64
- [11] Allan R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements[M]. FAO Irrigation and Drainage Paper No.56. Rome, Italy, 1998: 29-64
- [12] 宋妮, 孙景生, 王景雷, 等. 基于 Penman 修正式和 Penman-Monteith 公式的作物系数差异分析[J]. 农业工程学报, 2013, 29(19): 88-97
- [13] 龚元石. Penman-Monteith 公式与 FAO-PPP-17 Penman 修正式计算参考作物蒸散量的比较[J]. 北京农业大学学报, 1995, 21(1): 68-75
- [14] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近 50a 中国西南地区地表干湿状况研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1): 104-116
- [15] 王允, 刘普幸, 曹立国, 等. 基于湿润指数的 1960—2011 年中国西南地区地表干湿变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5): 830-838
- [16] 赵璐, 崔宁博, 梁川, 等. 基于云模型的四川省潜在蒸散量时空分布研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2013, 45(1): 91-97
- [17] 祝昌汉. 再论总辐射的气候学计算方法(二)[J]. 南京气象学院学报, 1982, 5(2): 196-206
- [18] 冯禹, 崔宁博, 魏新平, 等. 川中丘陵区参考作物蒸散量时空变化特征与成因分析[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 78-86, 339
- [19] 冯禹, 付萧, 崔宁博, 等. 四川省参考作物腾发量时空分布特征及成因分析[J]. 中国农村水利水电, 2014, 56(10): 61-64
- [20] 谢贤群, 王菱. 中国北方近 50 年潜在蒸发的变化[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5): 683-691
- [21] 杨甫乐, 荣艳淑, 杨甫光. 四川盆地蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因子分析[J]. 水资源保护, 2014, 30(3): 38-44, 60
- [22] Allen R G, Jensen M E, Wright J L, et al. Operational estimates of reference evapotranspiration[J]. Agronomy Journal, 1989, 81(4): 650-662
- [23] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and irrigation water requirements[M]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.70, 1990: 332
- [24] 强小嫚, 蔡焕杰, 孙景生, 等. 陕西关中地区 ET_0 计算公式的适用性评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20): 121-127
- [25] 张慧智, 史学正, 于东升, 等. 中国土壤温度的空间插值方法比较[J]. 地理研究, 2008, 27(6): 1299-1307
- [26] 李海滨, 林忠辉, 刘苏峡. Kriging 方法在区域土壤水分估值中的应用[J]. 地理研究, 2001, 20(4): 446-452

Spatial Distribution Characteristics of Soil Moisture Regimes in Sichuan Province

WENG Qian, YUAN Dagang^{*}, ZHANG Chu, SONG Yigao, FU Hongyang,
CHEN Jianke, LI Qiquan, WANG Changquan

(College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: Soil moisture regime is one of the important diagnostic characteristics for determining soil taxa and a guarantee for sustainable utilization of soil resources. The ground climate data during 1951 to 1980 of 160 weather stations in Sichuan Province were collected for analysis of the spatial distribution of soil moisture regimes using the aridity index and quantitative diagnosis index of soil moisture regimes in Chinese Soil Taxonomy (3rd Edition). The aridity index and the potential evapotranspirations which were calculated with the FAO-56 Penman-Monteith and FAO-PPP-17 Penman models were spatially interpolated by the statistical knowledge and ordinary Kriging. Results showed that the soil moisture regimes in Sichuan Province are obviously different between regions and overall presented the “wet in east area but dry in west area” spatial distribution characteristics. There are mainly udic and ustic soil moisture regimes in Sichuan Province. The perudic soil moisture regimes are distributed in some areas of Yibin region. The udic soil moisture regimes are distributed in plain, hill and mountain areas of east Sichuan. The distribution of ustic soil moisture regimes are in mountain and plateau areas of the western Sichuan. Only some area of Derong is aridic soil moisture regimes. This study provided scientific basis for the classification of soil taxonomy and sustainable utilization of soil resources in Sichuan province.

Key words: Soil moisture regimes; Soil taxonomy; Aridity index; Sichuan Province