

中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析

尚宗波¹, 高 琼²

(1. 中国科学院植物研究所植被数量生态学研究开放实验室, 北京, 100093; 2. 北京师范大学资源科学研究所, 北京, 100875)

摘要: 中国气候信息库提供了全国太阳辐射日资料以及 12 个月的气温、降水量、相对湿度、日照百分率和风速资料。利用改进后的 Penman 式估算出全国潜在蒸散和干燥指数的空间分布, 以及降水量增加 10%, 平均气温上升 1.5℃、3.0℃和 4.5℃ 3 种假定未来气候情景下的潜在蒸散和干燥指数, 以评价全球气候变化对中国水分状况的可能影响。结果表明, 随着气温的升高, 潜在蒸散量会显著增加; 而干燥指数变化较为复杂, 与当前气候情景相比较, 降水量增加 10%, 平均气温上升 1.5℃ 时中国水分状况会稍微湿润, 气温上升 4.5℃ 时会稍微干燥, 而气温上升 3.0℃ 时中国水分状况将介于稍微润与稍干燥之间。

关键词: 水分状况; 潜在蒸散; 干燥指数; 全球气候变化; 敏感性分析

Assessing the sensitivity of China water condition to global climate changes

SHANG Zong-Bo¹, GAO Qiong² (1. Laboratory of Quantitative Vegetation Ecology, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China; 2. Institute of Resources Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: With the daily radiation data and monthly data of mean temperature, precipitation, relative humid, sunshine fraction and wind velocity amended Penman's method was used to calculate the potential evapotranspiration and the aridity index, at present and three prescribed climate scenarios, with temperature rise by 1.5℃, 3.0℃ and 4.5℃, and precipitation increase by 10%. The sensitivity of China water condition to global climate change was assessed. The simulated results indicate that under the three prescribed climate scenarios, the potential evaporation spiration will increase greatly with the raising of temperature. In the case of the change of aridity index, China will become a little wet under the first climate scenario, and a little dry under the third climate scenario comparing with the present situation. The water condition of China under the second climate scenario is just between the first and third Climate scenarios.

Key words: water condition; Potential evaporation spiration, aridity index; Global climate change; sensitivity analysis.

文章编号: 1000-0933(2001)04-0528-10 中图分类号: P461⁺.8 文献标识码: A

预计到 21 世纪中叶, 大气中 CO₂ 浓度将增高到目前 (350 μmol/mol) 的两倍, 由于 CO₂ 等气体的温室效应, 地球表面大气温度可能升高 1.5~4.5℃^[1]。降水量、潜在蒸散量 (Potential evapotranspiration) 和干

基金项目: 国家自然科学基金重大基金 (No. 39899370), 国家自然科学基金 (No. 39770133), 国家自然科学基金杰出青年基金 (No. 39725006) 和中国科学院资源与生态环境重大资助项目 (B: KZ951-B1-108)

中国科学院植被数量生态学开放实验室提供中国气候资料、地形图和数字化后的地形资料, 杨奠安教授帮助完成空间图形分析, 特此表示感谢。

收稿日期: 2000-03-23; 修订日期: 2000-07-18

作者简介: 尚宗波 (1973~), 男, 山东省邹平县人, 博士。主要从事生态学模型、全球变化、生物地球化学循环模型及数字地球模型研究。

燥指数(或湿润指数)能够描述区域水分“收入”或(和)“支出”情况,作为敏感性指标,可以用来指示中国水分状况对未来全球气候变化的响应。

区域蒸散由于研究区域空间和时间的复杂性,一直是陆面蒸发过程研究中的薄弱领域。目前估算潜在蒸散量的方法主要有理论分析方法,经验方法和遥感方法 3 种^[2,3]。基于理论分析而导出的估算潜在蒸散量的方法主要有空气动力学法,能量平衡法和综合法(Penman 公式)^[2],特别是 Penman 法^[4~6]以及改进后的 Penman 公式^[7~12],如 Penman-Monteith 法^[8]和 FAO 法^[5]等是最常用的方法。根据潜在蒸散与气象因素的相关关系建立起来的经验公式较多^[2],利用单一气象因素,如利用气温为指标,以及利用太阳辐射(或地面净辐射)、积温、空气湿度、空气饱和差等为指标,已经建立了许多经验公式来估算潜在蒸散量;利用多个气象因素估算潜在蒸散量。由于经验公式的建立^[13],特别是经验常数是在具体田间试验条件下得到的,使得经验方法往往具有较大的局限性。通过卫星或飞机的高精度辐射探头,在高空遥测地表面温度和地表光谱反射率以及 NDVI 指数,结合地面气象和植被要素,反演蒸散通量,被认为是估算区域潜在蒸散最有前途的手段^[3]。Jensen 等^[14]比较了 20 种估算潜在蒸散的方法发现,利用 Penman-Monteith 方法分别估算多种气候条件下干燥和湿润地区灌溉良好的草地和苜蓿地的潜在蒸散时具有最高的准确率,而 Thornthwaite 方法则分别名列第 13 和第 20 位。利用 Penman 法估算区域或全球蒸散时,最大的困难是需要很多气候要素的准确观测资料。

自 20 世纪 80 年代末以来,国际上很多著名的气候变化影响研究都是以大气环流模式(GCMs)的方法来建立气候变化情景的^[16]。GCMs 作为目前模拟全球气候物理过程的唯一可靠工具^[16],可以提供影响评价所需要的、一致的、有物理基础的有关区域气候变化的估算。然而除了 GCMs 自身存在的对大气、海洋和陆地各种过程模拟中的一些重大弱点^[16]之外,该方法在使用中同时存在许多不足之处,如预测结果不够准确;不能产生满足影响评价所需要的时间和空间尺度的输出结果;国际上已经建立起来的几十个 GCMs 对未来气候预测结果差别很大,有的结果甚至相反;GCMs 对未来气候情景的预测结果难以检验等。作为对地球的大气、海洋和陆地变面及其复杂过程模拟的有效探索,GCMs 存在的各种缺点可以通过对 GCMs 的不断发展和完善,以及将 GCMs 与区域模型相结合等进一步解决。作为对未来全球变化对陆地生态系统影响研究的另一种手段,即给出未来气候变化的几种假定情景下,分别探讨陆地生态系统在这几种气候情景下的反应,可以研究气候变化对生态系统影响的敏感性分析,近年来得到快速发展。

唐国平等^[17]选取了 3 个较为成功的 GCMs:HadCM2,CGCM1(The first version of the canadian Global Coupled Model)和 ECHAM4,模拟了 CO₂ 浓度倍增情景下全球平均气温的响应分别为上升 2.5℃, 3.5℃和 2.6℃;2050s 前后中国的总降水量分别比现在上升 10.4%,4.7%和 10.4%。因此,本文基于中国气候信息库提供的全国气候要素空间分布资料,参考 Rawson^[1]、林而达^[16]和唐国平^[17]研究结果,假定了中国 CO₂ 浓度倍增下的 3 种假定未来气候情景,即降水增加 10%,气温分别增加 1.5℃、3.0℃和 4.5℃;利用改进后 Penman 式分别估算了当前气候情景以及这 3 种气候情景下的潜在蒸散和干燥指数分布规律,用以进行中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析。需要指出的是,本文并不是对未来中国水分状况的一种预测。

1 方法

影响潜在蒸散的气候(气象)因子主要有辐射、气温、相对湿度、日照百分率以及风速等。利用气候学(气象学)公式^[18,19]计算了太阳辐射日资料,利用趋势面分析(Trend surface analysis, TSA)^[20~22]和空间插值方法形成了气温、相对湿度、日照百分率和风速 30a 各月平均资料和年平均资料,建立了中国气候信息库并实现了信息共享。利用改进后 Penman 式^[10~12]计算了潜在蒸散量和干燥指数空间分布规律。

1.2 中国气候信息库的建立

利用 Visual C++建立了中国气候信息系统^[23,24]①,并创建了中国气候气信库。

— 万方数据 —

① 尚宗波,杨莫安,高琼,等,利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律。生态学报,2001,21(5),待发表。

1.2.1 太阳辐射资料的形成 首先利用 1:500 000 中国地形图和数字化后的中国高程资料,建立了数字高程模型以计算栅格点的纬度、海拔高度、坡度、坡向和遮蔽度。利用傅抱璞方法^[18,19]计算栅格点太阳辐射日资料,包括:①太阳可照时间;②大气外界太阳辐射;③太阳总辐射量。

1.2.2 气温、相对湿度、日照百分率和风速资料的形成 趋势面分析方法^[20,21]是一种统计学模型,它可以揭示区域尺度的特定因子空间(或时空)分布规律。首先将中国分为东北区、华北区、华中区、华南区、内蒙区、西北区、青藏区和西南区 8 个区域;为了避免区域交界处的数据“跳跃”现象,各个区域与相邻区域之间都存在一定的重叠。利用数字高程模型得到全国各栅格点的经度、纬度、海拔高度,利用全国气象观测站点多年观测资料,分别建立气候要素的趋势面分析模型。得到趋势面分析模型后,利用下式,既可以计算得到全国各栅格点气候要素的趋势值:

$$\hat{Y}_{i,j} = D_{i,j} \tilde{A}_T \tag{1}$$

式中, $\hat{Y}_{i,j}$ 为栅格点气候要素空间分布的趋势值, $\tilde{A}_T$ 为利用广义逆算法^[22]计算得到趋势面分析模型的系数矩阵, $D_{i,j}$ 为行向量:

$$D_{i,j} = \{1, z, z^2 \cdots, z^s, y, yz, yz^2 \cdots yz^{s-1} \cdots, y^{s-1}, y^{s-1}z, y^s, x, xz, xz^2 \cdots, xz^{s-1}, xy, xyz, \cdots, xyz^{s-2} \cdots, xy^{s-1}, x^2, x^2z \cdots, x^2z^{s-2}, x^2y, x^2yz \cdots, x^2yz^{s-3} \cdots, x^{s-1}y, x^s\} \tag{2}$$

x, y, z 分别为该栅格点经度、纬度和海拔高度经转换(每项分别除以 10 的倍数使得各项均小于 1)后的值。

趋势面分析的剩余值可以看作局地因子和随机要素的共同作用,它不能用大尺度地形因子分析结果解释,因此利用空间插值方法,将剩余值插值到各个栅格上。空间插值方法有很多种,本文采用以下方法:利用气候信息系统,寻找栅格点周围临近的 6 个气象站点,并保证在东、西、南、北 4 个方向上至少有一个站点,然后利用以下公式计算插值结果:

$$V_p = (\sum_{i=1}^t (V_i/d_i)) / (\sum_{i=1}^t (1/d_i)) \tag{3}$$

式中, V_p 为剩余值插值结果, d_i 为距离相邻气象站点的距离, V_i 为相邻气象站点趋势面分析产生的剩余值, t 为相邻气象站点的个数。通过趋势面模型模拟和剩余值插值方法可以最后计算出气候因子栅格资料并进行空间分布规律的分析。

1.3 潜在蒸散量和干燥指数

参考改进后的 Penman 式^[10-12],潜在蒸散由下式确定:

$$ET_p = K \cdot \left\{ \frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} \cdot [\zeta \cdot Q_a(a + b \frac{n}{N}) - \sigma T^4(0.56 - 0.079 \sqrt{e_a})(0.1 + 0.9 \frac{n}{N})] \right. \\ \left. + 0.26(e_a - e_d)(1 + c \cdot U_2) \right\} / [\frac{P_0}{P} \cdot \frac{\Delta}{\gamma} + 1] \tag{4}$$

式中, ET_p 为潜在蒸散(mm); P_0 和 P 分别为海平面及研究地的平均气压(hPa); Δ 为饱和水气压与温度关系曲线斜率(hPa/°C); γ 为干湿表常数(hPa/°C); Q_a 为天文辐射通量(MJ/m²/d); e_a 为空气饱和水 e_d 气压(mm);为实际水气压(mm); U_2 为 2m 高度的风速(m/s); Δ 为 Stefan-Boltzman 常数; K 为修正系数, ζ 为常数, a, b, c 为参数。由于中国气象站点通常观测为 10m 高度风速,研究发现通过修改参数的值,利用 10m 高度风速观测资料同样可以得到较高的准确率。

干燥指数作为指示气候干燥和湿润程度的指标,有许多定义方法。本文采用下式计算干燥指数:

$$A_I = \log_{10}(ET_p/R) \tag{5}$$

式中, A_I 为干燥指数, ET_p 为潜在蒸散(mm), R 为降水量(mm)。

2 资料来源与处理

研究中使用了如下资料:(1) 中国 954 个气象观测台(站)1951 年到 1980 年 30a 各月平均气温、降水量、相对湿度、日照百分率、风速,905 个气象观测台(站)1951 年到 1980 年 30a 各月蒸发资料;(2) 由中国气候信息库¹提供的全国太阳辐射日资料,气温、降水量、相对湿度、日照百分率、风速月平均资料和年平均资料,各种气候要素数据库以 2 进制形式存储于 212 个文件中,每个文件覆盖 3°×2°(经度×纬度),保存

96×96 个栅格点信息;(3) 1:500 000 中国地形图;(4)数字化后的中国高程资料。

3 结果

3.1 潜在蒸散和干燥指数的计算

根据中国气象站点 1951~1980 年 30a 各月平均观测资料,利用改进后的 Penman 式估算了各月的潜在蒸散量,与 905 个气象站点 10860 个有效观测的蒸发量资料进行了比较(见图 1),结果说明改进后的 Penman 法具有很高的准确率($R^2=0.9288$)。

采用中国气候信息库提供的中国 1951~1980 年 30a 各月平均气温、相对湿度、日照百分率和风速资料,以及太阳辐射日资料,利用改进后的 Penman 式估算了各月潜在蒸散量的空间分布规律,累加后得到全年潜在蒸散总量空间分布规律,然后计算了干燥指数的空间分布规律,并利用了生态信息系统进行了图形分析。

3.2 中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析

利用改进后 Penman 式分别估算了当前气候情景以及各月降水增加 10%,各月平均气温分别增加 1.5℃、3.0℃和 4.5℃ 3 种假定未来气候情景下的潜在蒸散和干燥指数分布规律,用以进行中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析。

为了更直观表示 3 种假定未来气候变化情景下中国水分状况变化情况,分别统计了潜在蒸散和干燥指数在连续变化范围内土地面积占全国陆地总面积的百分数(见图 2,3),并统计了全国平均潜在蒸散和干燥指数(见表 1)。

表 1 当前气候情景与 3 种假定未来气候情景下中国陆地生态系统平均潜在蒸散和干燥指数
Table 1 Average potential evapotranspiration and arid index of terrestrial ecosystem in China under three prescribed climate scenarios and present situation

气候情景 Climate scenarios	平均潜在蒸散(mm) Average potential evapotranspiration	平均干燥指数 Average Aridity Index
当前气候情景 Present situation	1932.98	0.7402
平均气温增加 1.5℃ & 降水增加 10% Raising temperature by 1.5℃ and precipitation by 10%	2035.97	0.7205
平均气温增加 3.0℃ & 降水增加 10% Raising temperature by 3.0℃ and precipitation by 10%	2140.83	0.7424
平均气温增加 4.5℃ & 降水增加 10% Raising temperature by 4.5℃ and precipitation by 10%	2247.48	0.7636

从图 2,3 及表 1 中可以看出,随着气温的增加,全国潜在蒸散小于 2000 mm 地区面积比例迅速减少,而大于 2000mm 区域面积比例迅速增加,可以得出结论:随着气温的增加,潜在蒸散量将增加。干燥指数变化较为复杂,在 3 种假定未来变化情景下,随着气温的增加,中国将变得更加干燥;与当前情景相比较,在第 1 种假定未来气候情景下,中国将变得稍微湿润,而第 3 种情景下将变得稍微干燥,而第 2 种情景下中国水分状况变化较小。

4 讨论

本文利用中国气候信息库提供的气候资料,采用改进后的 Penman 式分别计算了中国当前气候情景以及 3 种假定未来气候情景下(降水增加 10%,气温分别增加 1.5℃、3.0℃和 4.5℃)中国潜在蒸散和干燥指数空间分布情况,用以进行中国水分状况对全球气候变化的敏感性分析。结果表明,气温增加 3.0℃的作用

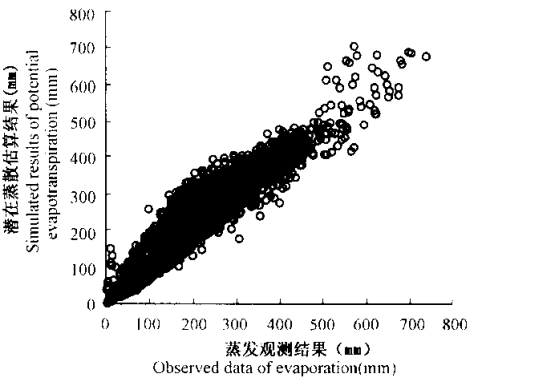


图 1 利用改进后的 Penman 式估算潜在蒸散量与气象站点蒸发观测资料比较
Fig. 1 Comparison between observed evaporation data (from meteorological observation stations) and simulated potential evapotranspiration data (by amended Penman's formula).

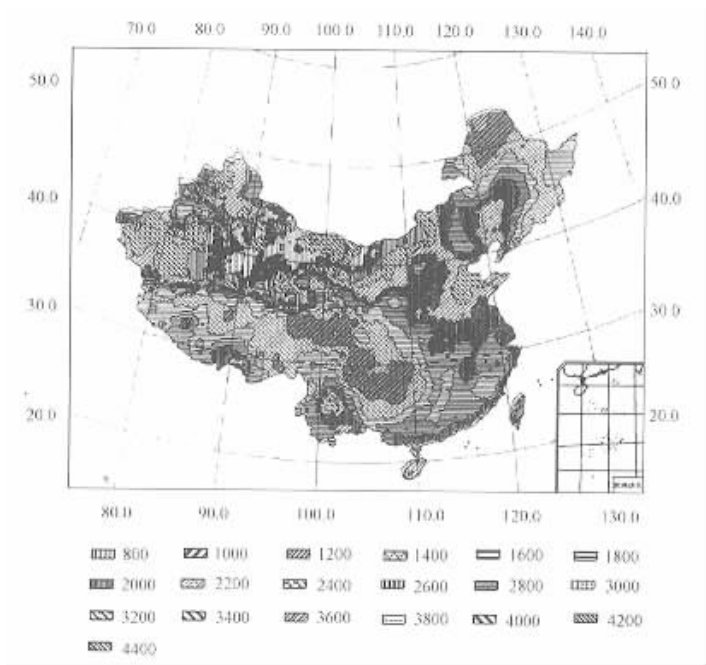


图 2 中国潜在蒸散空间分布图

Fig. 2 Spatial distribution of potential evapotranspiration in China

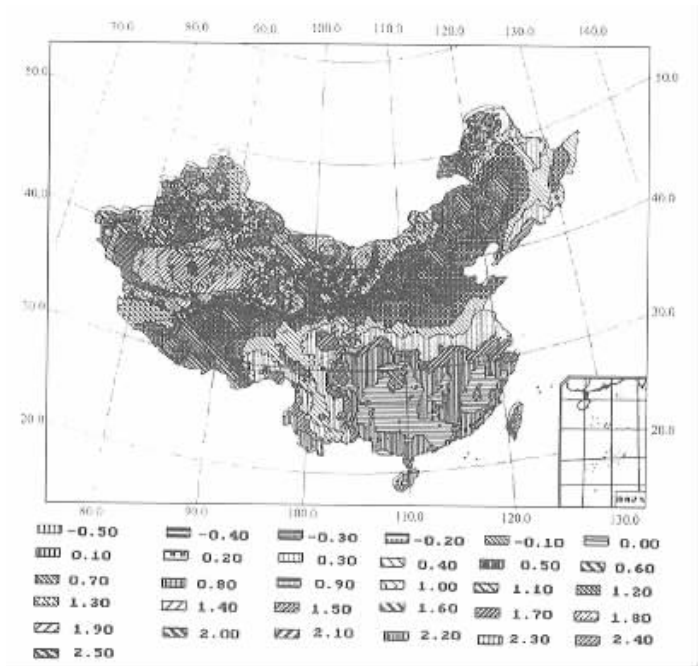
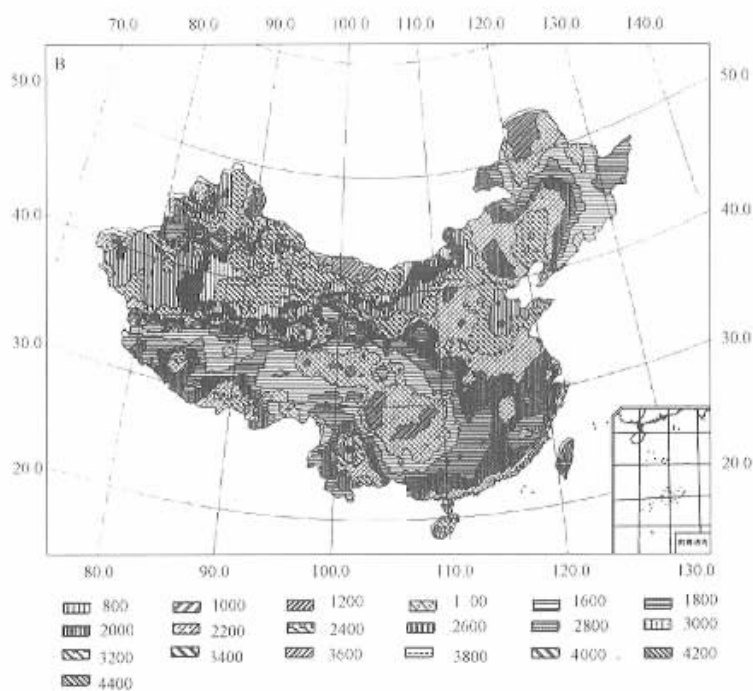
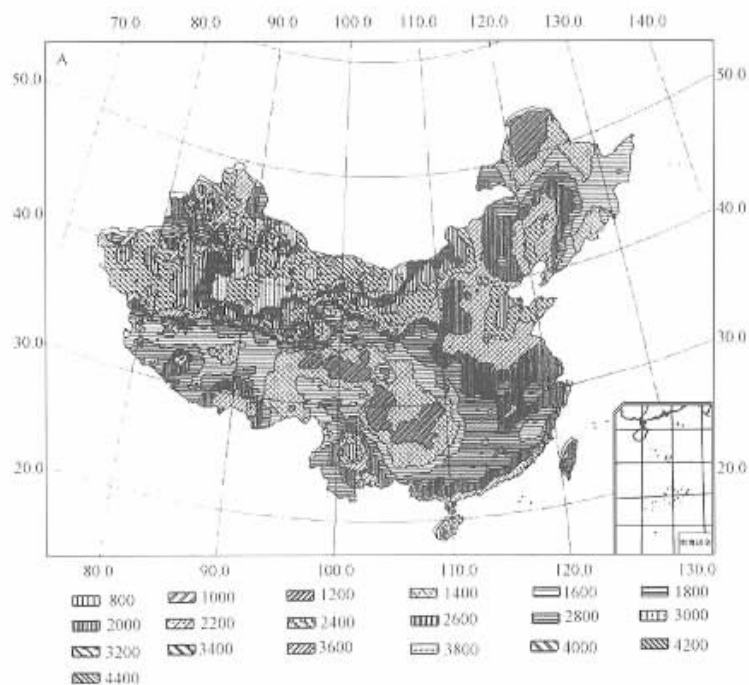


图 3 中国干燥指数空间分布图

Fig. 3 Spatial distribution of aridity index in China



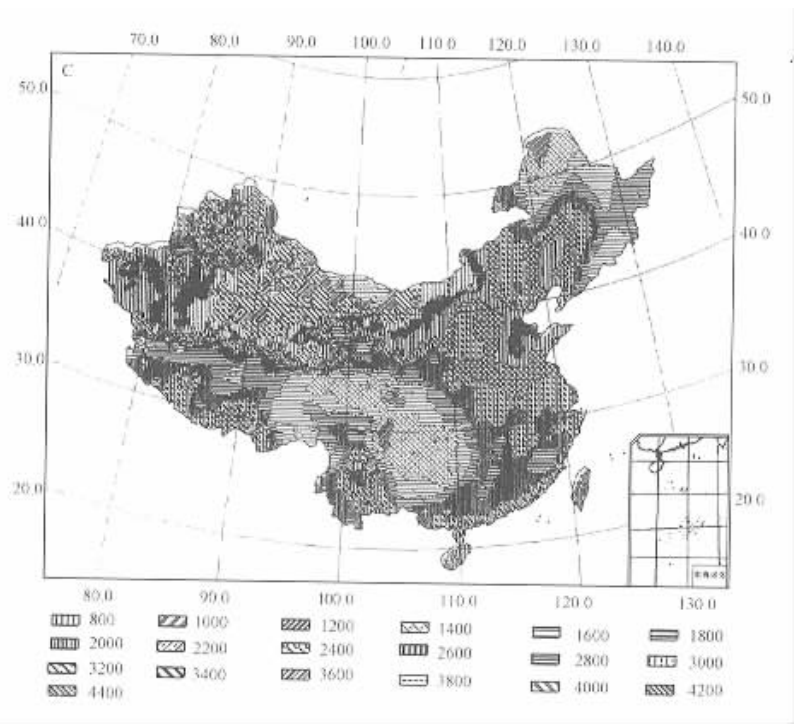
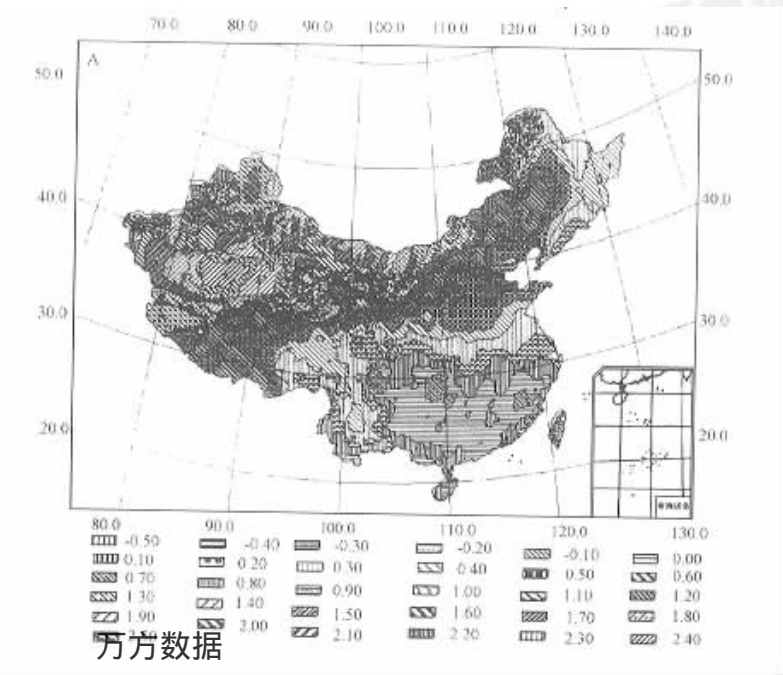


图 4 3 种假定未来气候情景下中国潜在蒸散空间分布图,A:平均气温增加 1.5℃;B:平均气温增加 3.0℃;C:平均气温增加 4.5℃

Fig. 4 Spatial distribution of potential evapotranspiration in China under three prescribed climate scenarios, including increasing temperature by A:1.5℃, B:3.0℃ and C:4.5℃ respectively



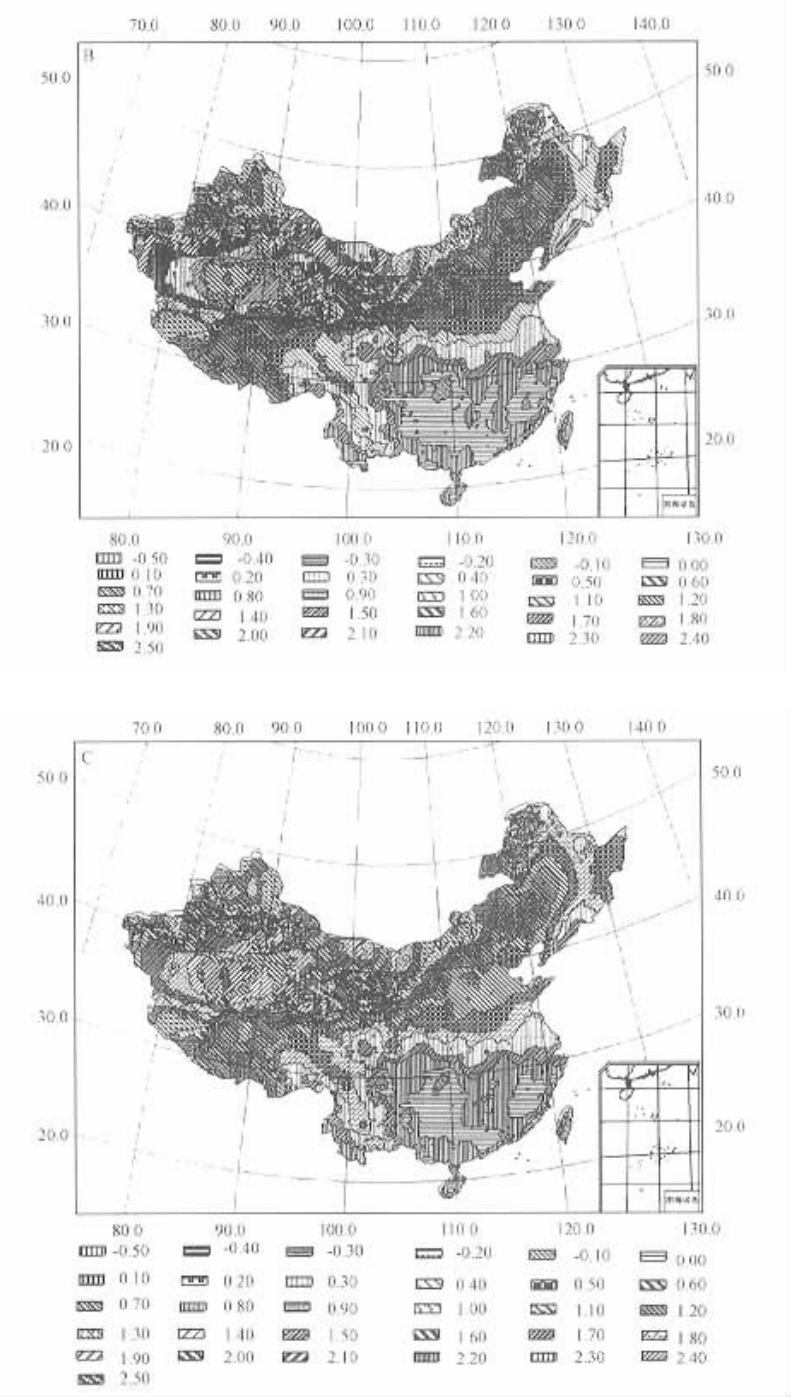


图 5 3 种假定未来气候情景下中国干燥指数空间分布图,A:平均气温增加 1.5℃ & 降水增加 10%;B:平均气温增加 3.0℃ & 降水增加 0%;C:平均气温增加 4.5℃ & 降水增加 10%。

Fig. 5 Spatial distribution of aridity index in China under three prescribed climate scenarios,including A:increasing temperature by 1.5℃ and precipitation by 10%,B:increasing temperature by 3.0℃ and precipitation by 10%, and C:increasing temperature by 4.5℃ and precipitation by 10% respectively.

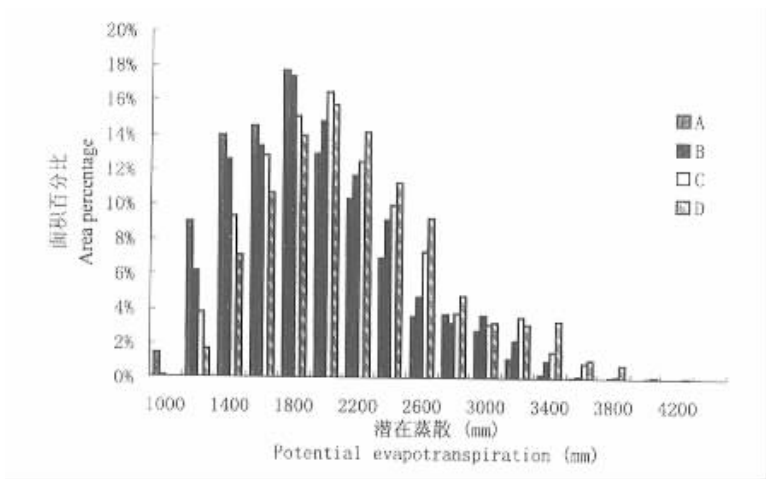


图 6 当前气候情景及 3 种假定未来气候变化情景下连续变化范围内中国潜在蒸散区域面积占全国陆地总面积的百分数

A: 当前气候情景; B: 平均气温增加 1.5 C; C: 平均气温增加 3.0 C; D: 平均气温增加 4.5 C。

Fig. 6 Percentage distribution of potential evapotranspiration in China under present situation and three pre-scribed climate scenarios; A: present situation, B: raising mean air temperature by 1.5 C, C: raising mean tem-perature by 3.0 C, and D: raising mean air temperature by 4.5 C.

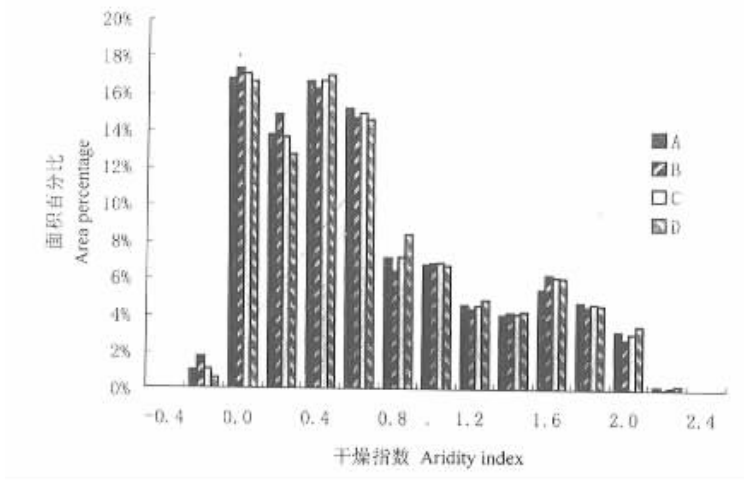


图 7 当前气候情景及 3 种假定未来气候变化情景下连续变化范围内中国干燥指数区域面积占全国陆地总面积的百分数

A: 当前气候情景; B: 平均气温增加 1.5 C & 降水增加 10%; C: 平均气温增加 3.0 C & 降水增加 10%; D: 平均气温增加 4.5 C & 降水增加 10%。

Fig. 7 Percentage distribution of aridity index in China under present situation and three prescribed climate scenarios; A: present situation, B: raising mean air temperature by 1.5 C and precipitation by 10%, C: raising mean air temperature by 3.0 C and precipitation by 10%, and D: raising mean air temperature by 4.5 C and precipitation by 10%.

万方数据

可以近似抵消降水增加 10% 的影响,使得干燥度指数变化不大。因为未来中国气候变化相当复杂,存在各地区气温增加幅度不同,甚至部分地区降温情况,降水改变幅度不同(如几种 GCMs 预测青藏地区平均降水量将明显增加,南北降水改变差异很大等),以及降水的季节分配、年度分配等变幅增大等,这种未来全球变化复杂情景下对中国水分状况的影响,需要进一步深入探讨。

参考文献

- [1] Rawson H M. Plant responses to temperature under conditions of elevated CO₂. *Austria J Bot.*, 1992, **40**:473~490.
- [2] 雷志栋, 杨诗秀, 谢森传. 土壤水动力学. 北京:清华大学出版社. 1988
- [3] Huang X and Lyons T J. Estimation of surface energy balance from radiant surface and NOAA AVHRR sensor reflectance over agricultural and native vegetation. *J Appl Mete.*, 1993, **32**:1441~1449.
- [4] Penman H L. Natural evaporation from open water, bare soil, and grass proceedings. *Royal Soc Series A.*, 1948, **193**: 454~465.
- [5] Penman H L. Evaporation over the British Isles. *Quar J Royal Mete Soc.*, 1950, **76**: 372~383.
- [6] Penman H L. Estimating evaporation. *Tran Ame Geo Union.* 1956, **37**: 43~50.
- [7] McCulloch J S G. Tables for the rapid computation of the Penman estimate of evaporation. *East African Agri Fore J.* 1965, **1**: 286~295.
- [8] Monteith J L. Evaporation and environment. Symposium Society Experiment Biology XIX. London: Cambridge University Press. 1965. 205~234.
- [9] Frere M and Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome. 1979. 41~45.
- [10] 张新时. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(一)——几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学学报. 1989, **13**(1): 1~9.
- [11] 张新时. 植被的 PE(可能蒸散)指标与植被-气候分类(二)——几种主要方法与 PEP 程序介绍. 植物生态学与地植物学学报. 1989, **13**(3): 197~207.
- [12] 刘昌明, 洪嘉珪, 金 淮. 农田蒸散量的计算. 见: 谢贤群, 左大康, 唐登银主编. 农田蒸发——测定与计算. 北京: 气象出版社, 1991. 34~142.
- [13] 高国栋, 陆渝蓉. 气候学. 北京: 气象出版社, 1988.
- [14] Jensen M E, Burman R D and Allen R G. Evaporation and Irrigation Water Requirement, ASCE Manual No. 70. American Society of Civil Engineers, New York. 1990. 332.
- [15] Monteith J L. Fifty years of potential evaporation. Proc. Conference. Trinity College, Dublin. 1994, 7~9 Sep. 29~45.
- [16] 林而达, 张 厚, 王京华. 全球气候变化对中国农业影响的模拟. 北京: 中国农业科技出版社, 1997. 1~9.
- [17] 唐国平, 李秀斌, Guenther F, 等. 气候变化对中国农业生产的影响. 地理学报. 2000, **55**(2): 129~138.
- [18] 傅抱璞. 山地气候. 北京: 科学出版社, 1980. 270.
- [19] 傅抱璞, 翁笃鸣. 小气候学. 北京: 气象出版社, 1994.
- [20] Chorley R J and Haggett P. Trend-surface mapping in geographical research. In: Berry B J L and Marble D F. eds. *Spatial Analysis; A Reader in Statistical Geography*. Englewood Cliffs, N J: Prentice-Hall Inc., 1968. 195~217.
- [21] Gittins, R. Trend-surface analysis of ecological data. *J Ecol.*, 1968, **56**:845~869.
- [22] 潘恩沛, 周杨杞. DJS-21 机多元统计程序集. 北京: 原子能出版社. 1984. 79~91.