

我国主要旱地作物水分供需状况 分析及改善对策*

李应林^{1,2)} 高素华³⁾ 郭建平³⁾

- 1) (中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 全球变化东亚区域研究中心, 北京 10029)
2) (中国科学院研究生院, 北京 100039)
3) (中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 建立了一个农田水分计算和评价模型, 并利用 1961~2000 年月平均气候和有关作物资料, 计算分析了我国 5 种主要旱地作物(春小麦、冬小麦、春玉米、夏玉米和棉花)的理论需水量及其时空分布, 利用水分订正系数为指标评价作物需水量的满足程度。结果表明, 气候条件对不同作物生产影响不同, 比如小麦生育期内普遍严重缺水, 玉米生育期水分供应比较充足, 但在山西、陕西等地, 夏玉米的播种期、出苗期及拔节期(6~8月)也存在明显的水分亏缺现象。作者针对我国北方农田干旱严重、水分供需很不平衡的情况, 提出了相应的改善建议。

关键词: 旱地作物; 水分供需; 改善对策

文章编号 1006-9895 (2004) 02-0331-11 **中图分类号** P142.2 **文献标识码** A

1 引言

水资源短缺是我国旱地作物种植中的重要问题。尤其在占我国国土面积 40%左右的干旱、半干旱区, 水资源不足是这些地区农作物生产中的主要限制因素。即使在水资源条件较好的地区, 在作物发育期的某些时段, 农田水分也难以满足作物生长发育的要求。因此研究农田水分供需状况, 可以为农业生产中进行合理的水分调配, 合理利用有限的水资源, 提高水分利用效率提供科学依据。许多学者从蒸散量的计算、作物耗水规律、水土资源平衡、田间观测等方面^[1~7]来研究作物水分供需, 取得了许多有价值的成果; 但总体上内容相对单一, 研究范围一般也较小。本文在前人工作的基础上, 建立了一个农田水分计算和评价模型, 计算作物需水量、水分盈亏、水分订正系数等与作物水分供求关系相关的量, 描述和评价我国 5 种主要旱地作物的水分供需分布特征; 并根据作物在不同地区、不同时段缺水程度和土壤水分状况提出了改善水分条件的建议, 这对农作物生产中合理利用水资源、节约成本、提高灌溉效率和产量具有指导意义。

2 农田水分计算和评价模型

该模型计算作物需水量、水分盈亏和水分订正系数, 需要输入的变量为容易得到

2004-02-16 收到, 2004-04-05 收到修改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1999043403 资助

的气象要素资料（降水量、平均温度、最高温度、最低温度、空气相对湿度、日照时数、平均风速）及作物栽培系数。计算时段可根据分析问题的需要确定为日、旬、月以及发育阶段或全生育期。

2.1 作物需水量

自然条件下，作物需水量主要受气象条件、土壤水分供应和作物生物学特性的综合影响。农田蒸散量（耗水量）可用如下函数式表示：

$$E_T = f(M)f(W_s)f(C), \quad (1)$$

式中， E_T 为农田蒸散量； $f(M)$ 为气象条件影响函数； $f(W_s)$ 为土壤水分影响函数； $f(C)$ 为作物生物学特性影响函数。一般采用参考作物的潜在蒸散 E_{T0} 来表征气象条件对农田蒸散的综合影响，而用作物栽培系数 K_c 来表征不同作物生物学特性对蒸散过程的影响。本文所说作物需水量均为理论需水量，指土壤水分供应充足情况下 [$f(W_s)$ 取1] 的作物需水量，即作物最大实际蒸散量，也叫作物最大实际蒸散量。可用下式表示

$$E_{Tc} = K_c \times E_{T0}. \quad (2)$$

2.2 参考作物潜在蒸散量 (E_{T0}) 的计算

采用1998年联合国粮食及农业组织（简称FAO）推荐的唯一标准方法，即FAO Penman-Monteith公式计算参考作物潜在蒸散量^[8]。该方法以空气动力学为基础，在中国大部分地区的计算结果较符合实际^[9]。计算公式^[8]如下：

$$E_{T0} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}, \quad (3)$$

式中， E_{T0} 为可能蒸散量（单位：mm）； R_n 为地表净辐射（单位： MJ m^{-2} ）； G 为土壤热通量（单位： MJ m^{-2} ）； T 为2 m高度处平均气温（单位： $^{\circ}\text{C}$ ）； U_2 为2 m高度处风速（单位： m s^{-1} ）； e_s 为饱和水汽压（单位：kPa）； e_a 为实际水汽压（单位：kPa）； Δ 为饱和水汽压曲线斜率（单位： $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）； γ 为干湿表常数（单位： $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ）。

$$R_n = (1 - \alpha)R_s - \sigma \left(\frac{T_{\max}^4 - T_{\min}^4}{2} \right) (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) (1.35 \frac{R_s}{R_{s0}} - 0.35), \quad (4)$$

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a, \quad (5)$$

$$R_{s0} = (0.75 + 2z \times 10^{-5}) R_a, \quad (6)$$

(4)至(6)式中， α 为反射率（无量纲），本公式取 $\alpha=0.23$ ； R_s 为地表短波辐射（单位： MJ m^{-2} ）； σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数（ $4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2}$ ）； $T_{\max}$ 为最高气温（单位：K）； $T_{\min}$ 为最低气温（单位：K）； R_{s0} 为晴天地表短波辐射（单位： MJ m^{-2} ）； a_s 为阴天（ $n=0$ ）地表短波辐射与大气层外太阳辐射的比例系数； $a_s + b_s$ 为晴天（ $n=N$ ）地表短波辐射与大气层外太阳辐射的比例系数； n 为实际日照时数； N 为最大可能日照时数； R_a 为大气层外太阳辐射（单位： MJ m^{-2} ）； z 为海拔高度（单位：m）；本公式取 $a_s=0.25$ ， $a_s + b_s=0.75$ 。

2.3 农田水分盈亏和水分满足程度

当农田水分供应不足时，水分的亏缺将造成产量下降。由于我国农田土壤水分最终主要来自大气降水，我们用一个地区降水与作物理论需水量的差来表示该地区作物水分盈亏，并利用水分订正系数 $F(R)$ 来描述该地的水分满足程度。 $F(R)$ 采用下式计

算^[10]：

$$F(R) = 1 - |\Delta W_j| / W_j \times K, \quad (7)$$

式中： $\Delta W_j = R_j - W_j$ 为作物水分盈亏额， R_j 是 j 时段的降水量， $W_j = E_{Tc}$ ； K 是与径流有关的参数。当 $\Delta W_j > 2 \text{ mm}$ 时，产生径流， $K < 1$ ，表明由于径流的存在使农田涝灾减轻；当 $\Delta W_j < 2 \text{ mm}$ 时，降水适中或偏少，没有径流，则 $K = 1$ 。当 $F(R) < 1$ ，说明该地的水分供应不能满足农作物生长发育的需要，农作物生长受到水分限制，产量将受到影响。

3 5 种旱地主要作物需水量的分布规律和水分满足程度评价

利用我国分布较均匀的 196 个站点 1961~2000 年的实测气象资料、作物栽培系数及发育期资料^[11,12] 和上述模型，计算了 1961~2000 年 40 年平均 5 种作物月平均及生育期需水量。气象资料来自国家气象中心气候资料中心。本文各图中“N”线为作物种植边界。

3.1 夏玉米需水量的分布规律和水分满足程度

夏玉米生长季基本是在 5 月下旬到 10 月，图 1 为夏玉米需水量分布。由图可见大部分种植区内夏玉米生育期需水量为 300~450 mm，新疆大部分地区为 450~500 mm 之间，长江中下游地区、广西大部、湖南中部及江苏东部小于 300 mm，北方夏玉米种植区内最大实际蒸散变化在 200~400 mm 之间。夏玉米种植区内气候比较湿润，降水量相对较多。大部分地区夏玉米全生育期水分供大于求，但在山西的西南部、陕西中南部、甘肃东南部仍存在水分亏缺区，亏缺量为 20~85 mm。

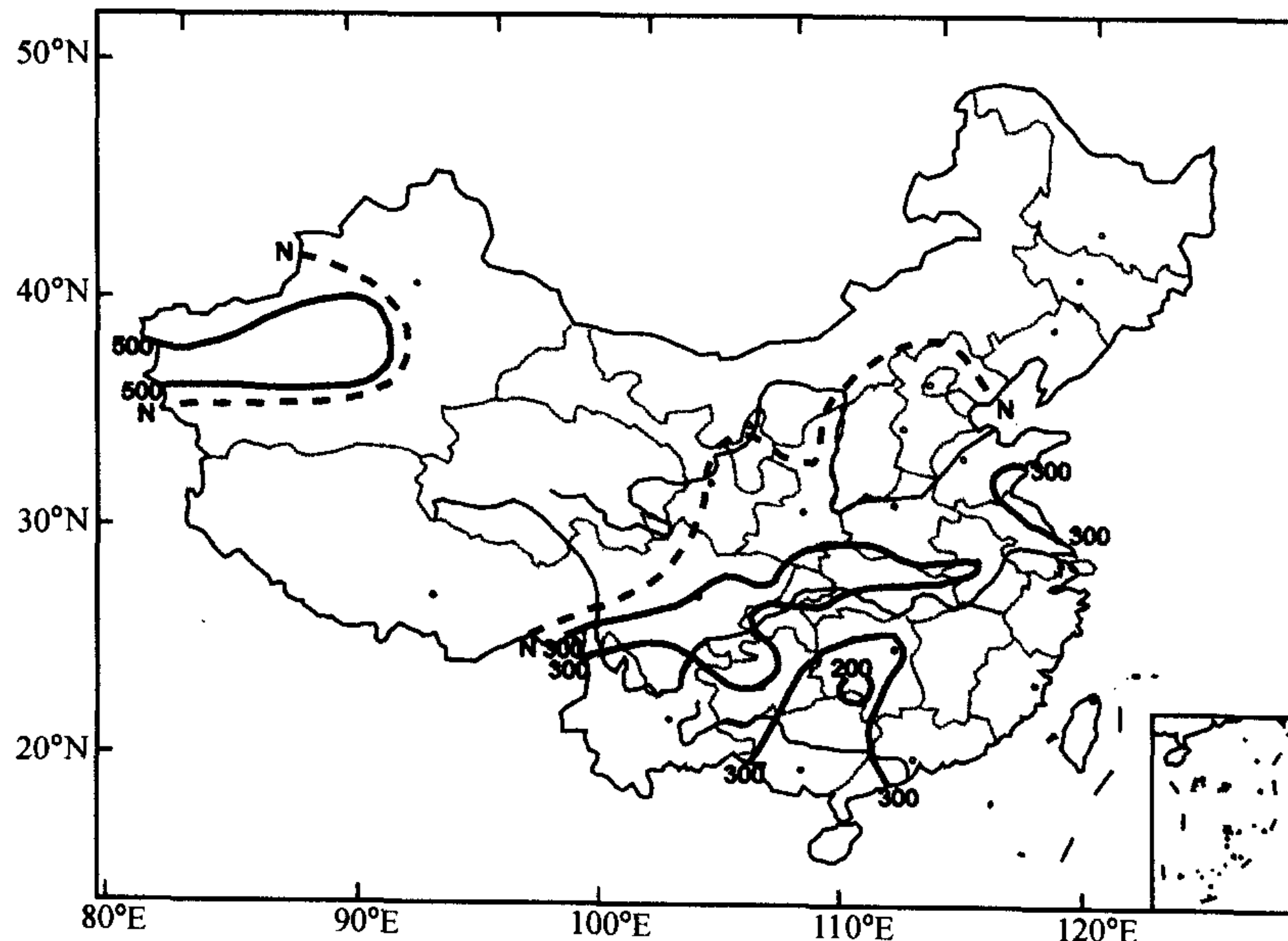


图 1 我国夏玉米生育期需水量分布 (单位: mm)

“N”线为作物种植边界，下同

水分订正系数可以反映出一个地方的水分满足程度或农田水资源供求状况。由图 2 可见，夏玉米种植区水分订正系数为 0.8~0.9，新疆夏玉米种植区为水分亏缺地区，北部水分订正系数为 0.1~0.3，西部小于 0.1，这一地区如果没有灌溉就没有农业。全生育期的需水量和水分订正系数反映了全生育期水分供需的基本状况，但在不同的生育阶段，夏玉米对水分的需求量和对缺水的反应也是不同的，苗期需水量较少，中后期需水量较多。玉米拔节以后，进入旺盛营养生长和生殖生长阶段，植株生长加快，干物质积累急剧增加，这时气温也日渐升高，需水量迅速增加。抽雄前后对水分更加敏感，抽雄前 10 天和后 20 天是玉米的水分临界期，这时的水分供应最为有效，如果这个时期缺水，易出现“卡脖旱”^[1,5]。灌浆期是玉米茎叶光和产物和营养物质大量向籽粒输送时期，需水量也比较多，拔节到灌浆的天数占全生育期的比例不到 50%，而需水量却占全生育期的一半以上，腊熟至收获阶段，植株蒸腾减少，需水量也较少。表 1 列出了我国各地区典型站点夏玉米生育期的水分订正系数。一般是 6 月出苗期及 9 月份的生育后期缺水较严重。

表 1 不同地区夏玉米生育期内各月水分订正系数

地 区	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	全生育期
北 京		0.66	1	1	0.46		1
石 家 庄		0.46	1	1	0.52		1
郑 州		0.52	1	1	0.87		1
西 安		0.51	0.87	0.62	1		0.78
大 同		0.42	0.98	0.85	0.5		0.77
成 都	1	1	1	1	1		1
上 海		1	1	1	1		1
长 沙	1	1	1	0.9			1
广 州			1	1	1	0.73	1
库 车		0.11	0.09	0.08	0.05	0.04	0.07
莎 车		0.07	0.05	0.06	0.03	0.02	0.05

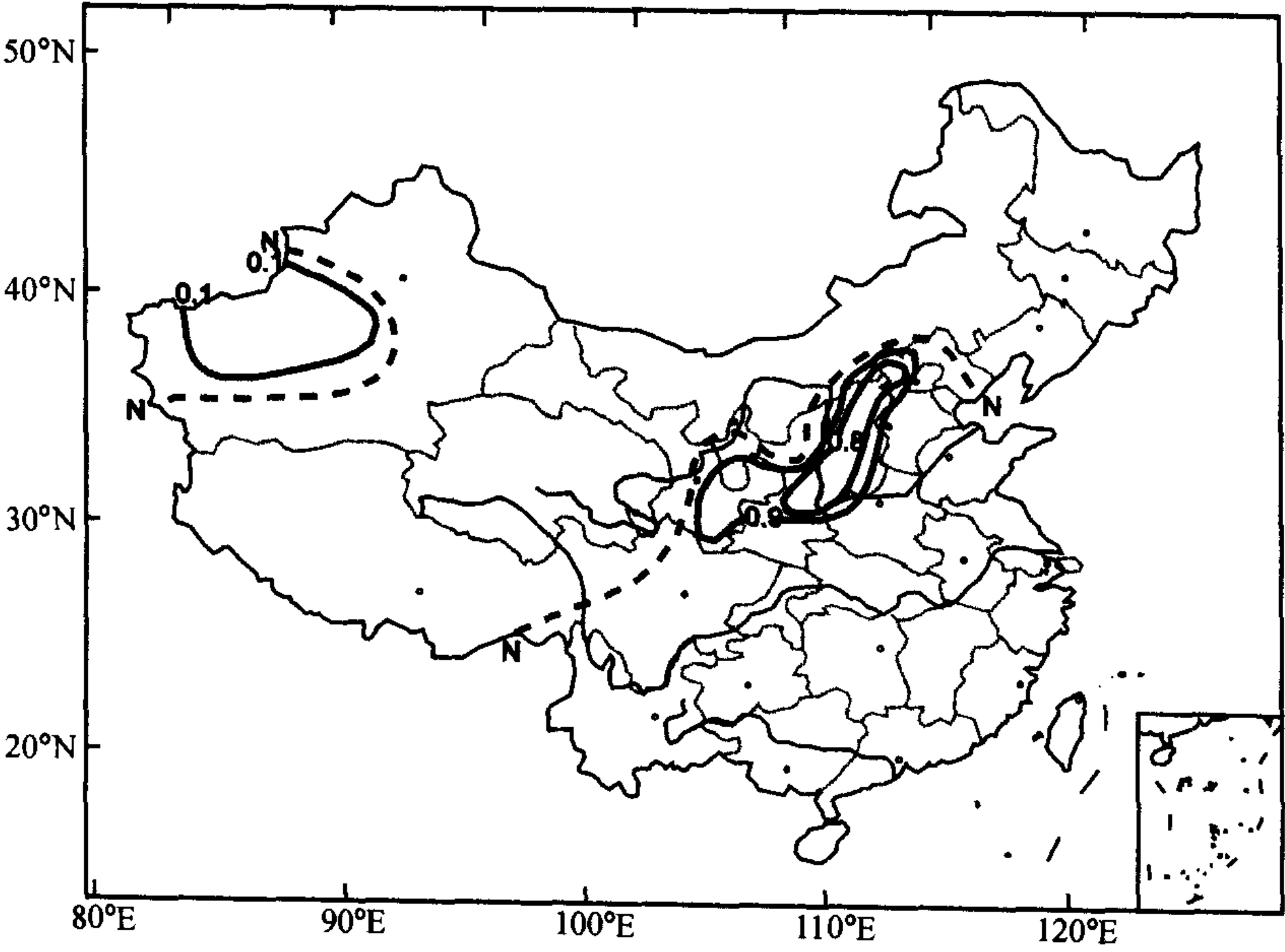


图 2 我国夏玉米生育期水分订正系数分布

3.2 春玉米需水量的分布规律和水分满足程度

春玉米生育期较夏玉米长，需水规律同夏玉米基本相同。由图 3 可见，我国春玉米理论需水量由南向北呈逐渐增加趋势，不同地区春玉米全生育期需水量大致为 300~650 mm，大部分地区为 450~550 mm。形成这种分布的主要原因一个是越往南气温越高，气温通过自身对湿度的影响间接影响农田蒸发；另一个原因是越往北降水越少，越干旱，农田蒸发面上的空气湿度梯度越大，农田用于蒸发和蒸腾的水分消耗就越多。

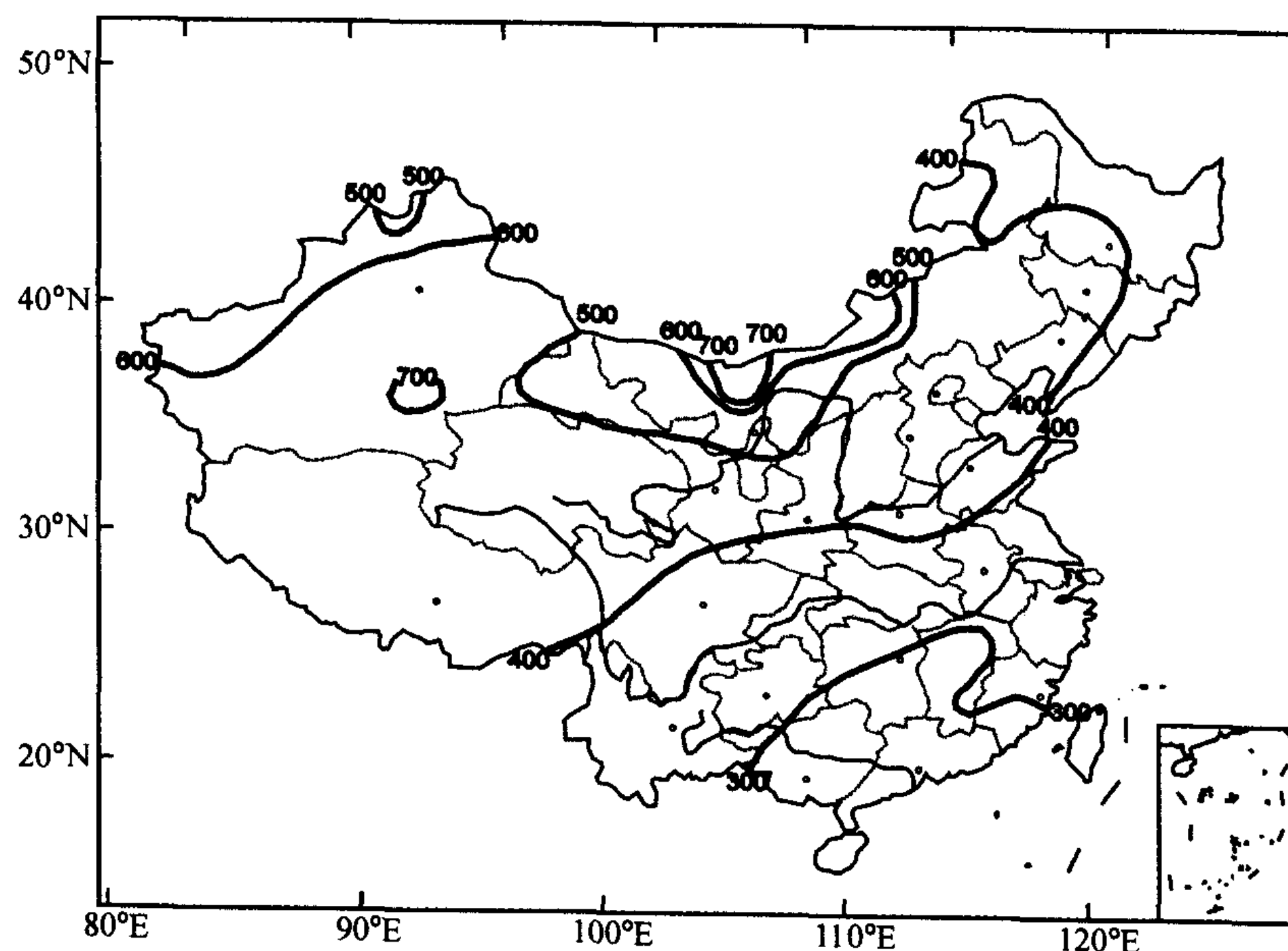


图 3 我国春玉米生育期需水量分布 (单位: mm)

由图 4 可见，春玉米种植区水分保证程度较高，但南部地区降水充沛，容易出现涝灾，因此从水分条件来看水分订正系数 1.0 线附近的地区最适合春玉米的种植，这与我国春玉米在生产实际中的主要种植区呈东北—华北—西南的分布趋势是相一致的。

3.3 冬小麦需水量的分布规律和水分满足程度

冬小麦是我国三大农作物之一，在我国种植很广，其生长期长，需水量较多。由图 5 可见其种植区内需水量的分布是由南向北逐渐增加，从 300 mm 到 800 mm 不等 (主要种植区为 400~550 mm)。冬小麦生长季缺水现象比较严重，由南向北缺水逐渐增多，黄河、长江之间大部地区水分亏缺 100~300 mm，黄河以北地区亏缺 400~500 mm，京津地区、河北北部均在 500 mm 以上。这些地区都是冬小麦的主产区，冬小麦单产水平处于全国领先水平，主要是因为灌溉条件优越，水利设施较完善。西部的陕西、甘肃、四川、云南冬小麦生长季水分亏缺一般在 300 mm 以上。如图 6 所示，冬小麦田水分满足程度均较低，秋旱、冬旱连春旱严重，而此时正是冬小麦的需水关键期，即冬前的分蘖期和春季的拔节期，灌溉是获得丰产的必备条件。

3.4 春小麦需水量的分布规律和水分满足程度

春小麦生长期比冬小麦短，生长季一般为 4~7 月，需水量较少。由图 7 可见，其生长季最大实际蒸散量一般在 300~500 mm。春小麦种植区内生长季水分亏缺，基本

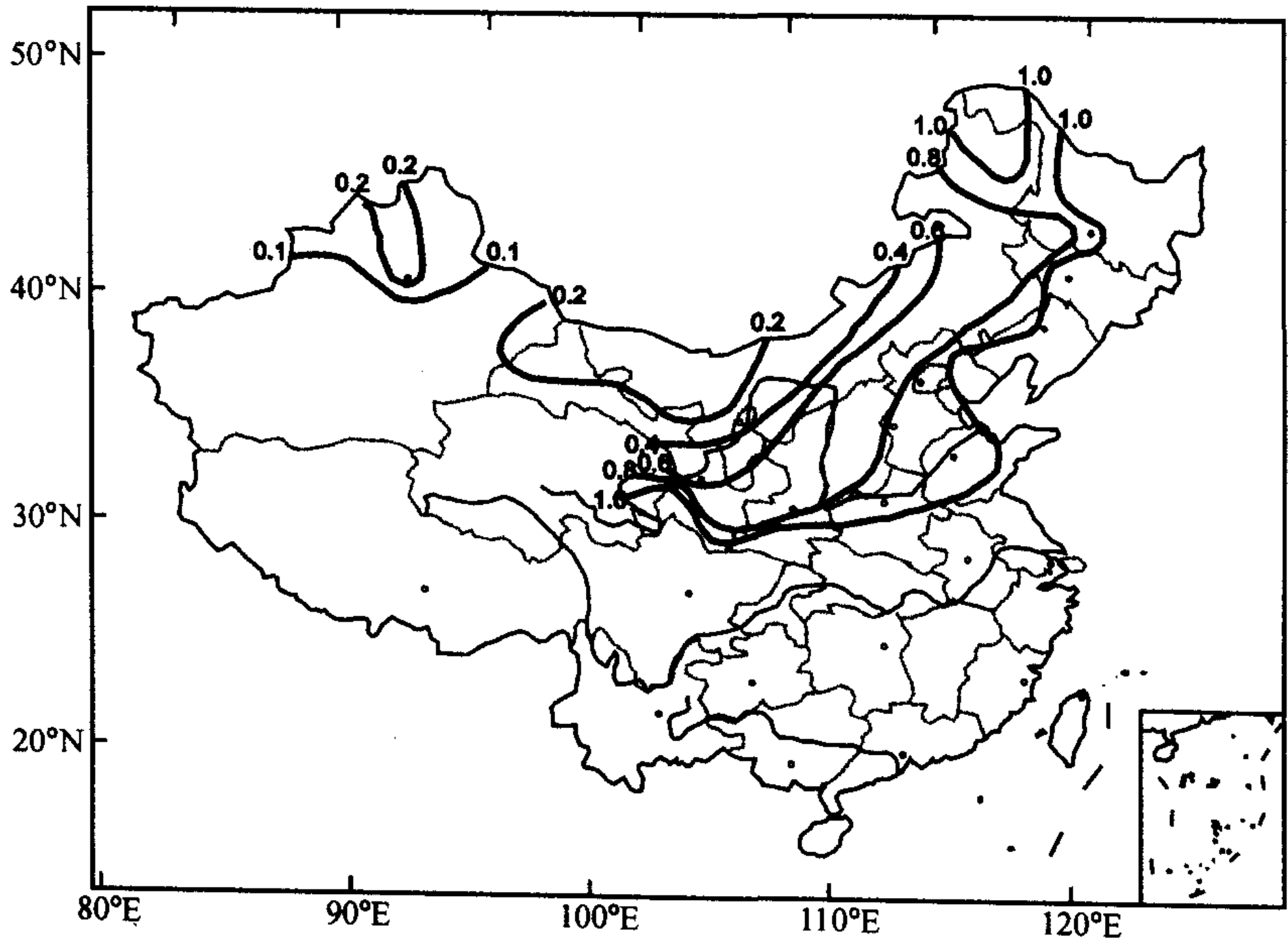


图 4 我国春玉米生育期水分订正系数分布

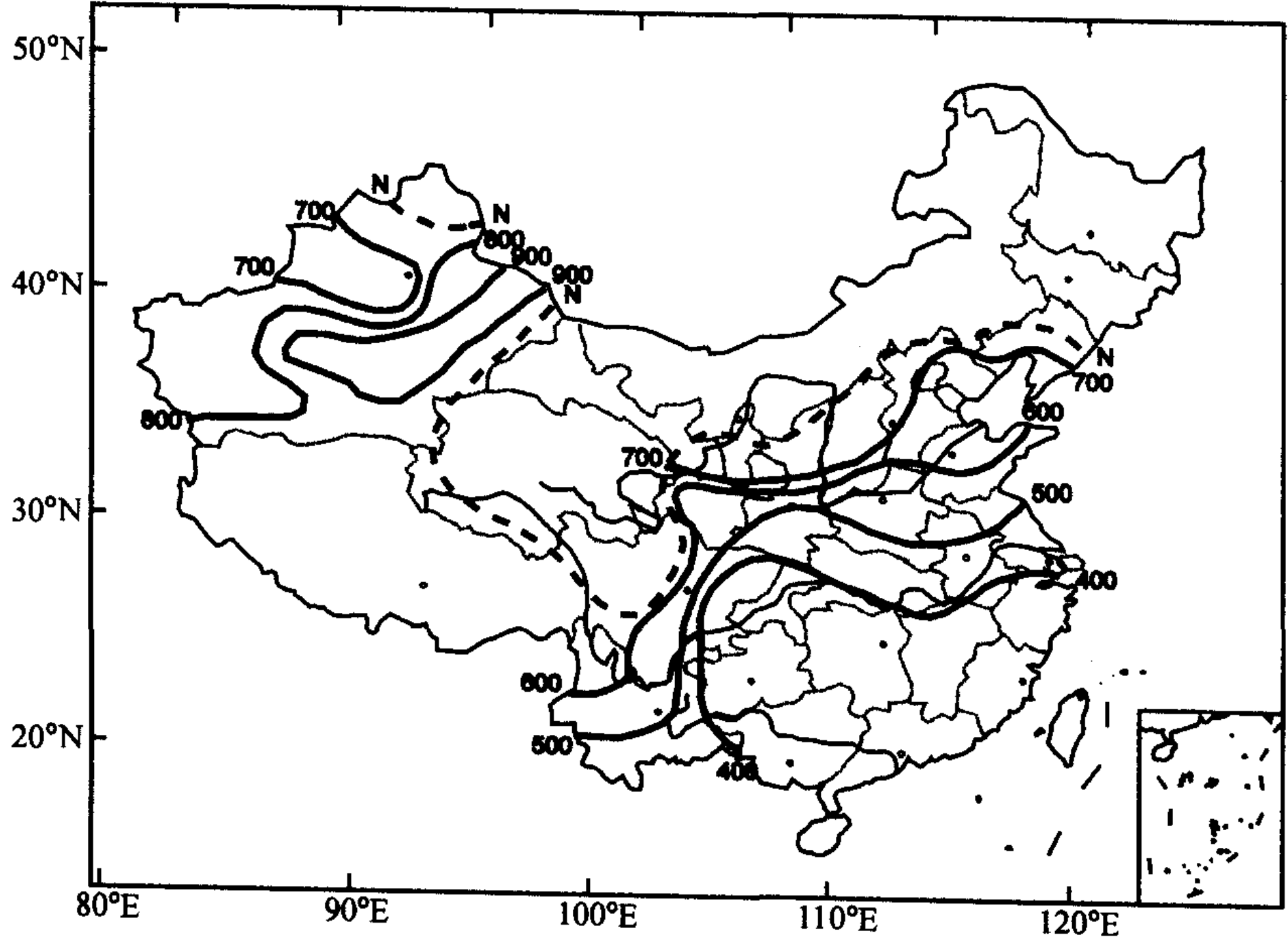


图 5 我国冬小麦生育期需水量分布 (单位: mm)

上是由东向西增加的,除东北最北部及东南部的小部分地区,其他地区均为水分亏缺区。由图 8 可见,春小麦种植区内的大部分地区,水分满足程度较低,水分订正系数线基本呈经向分布。

3.5 棉花需水量的分布规律和水分满足程度

棉花是我国主要的经济作物之一,此种作物喜温喜光,耐旱怕涝。从气候条件来

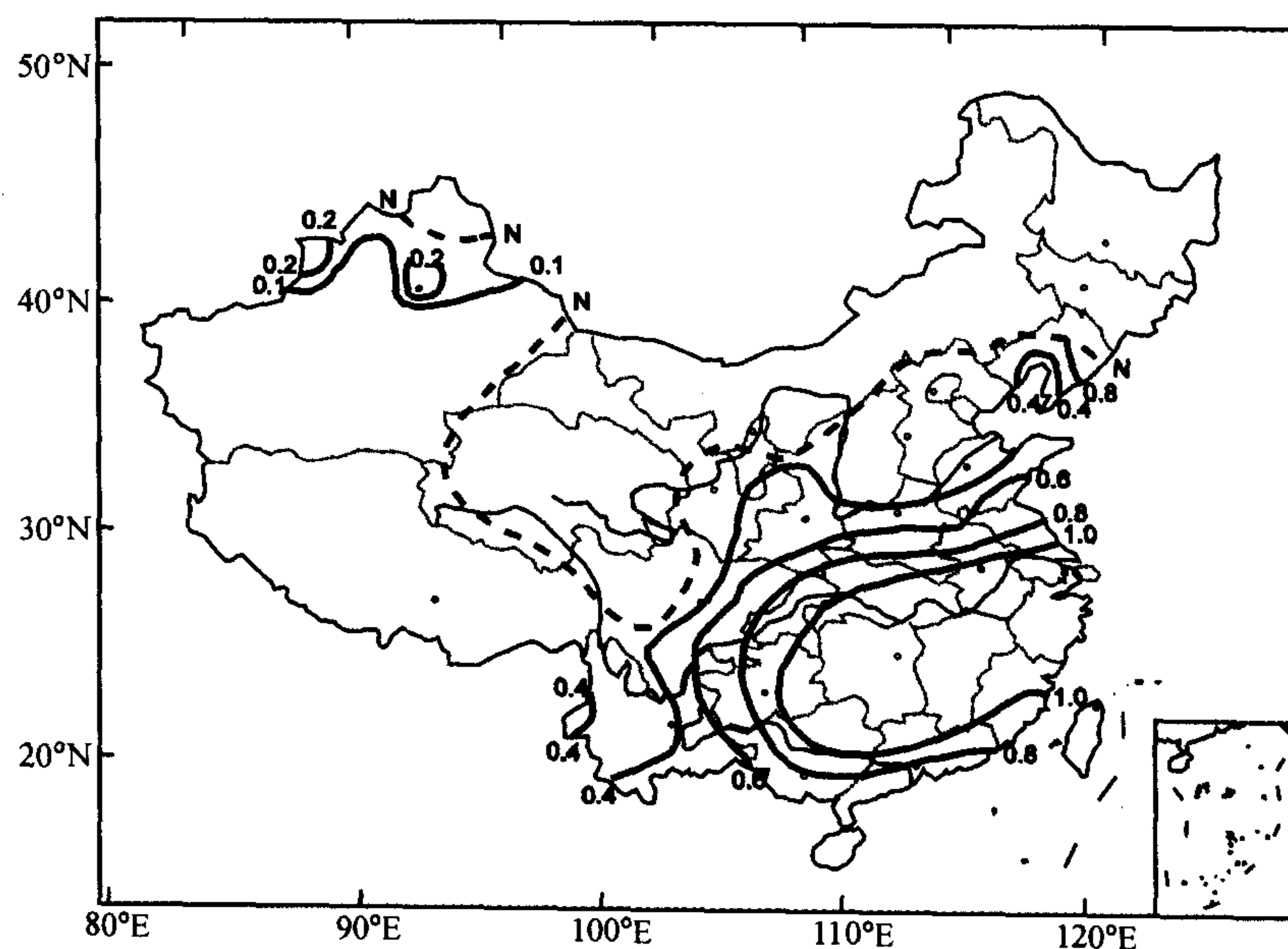


图6 我国冬小麦生育期水分订正系数分布

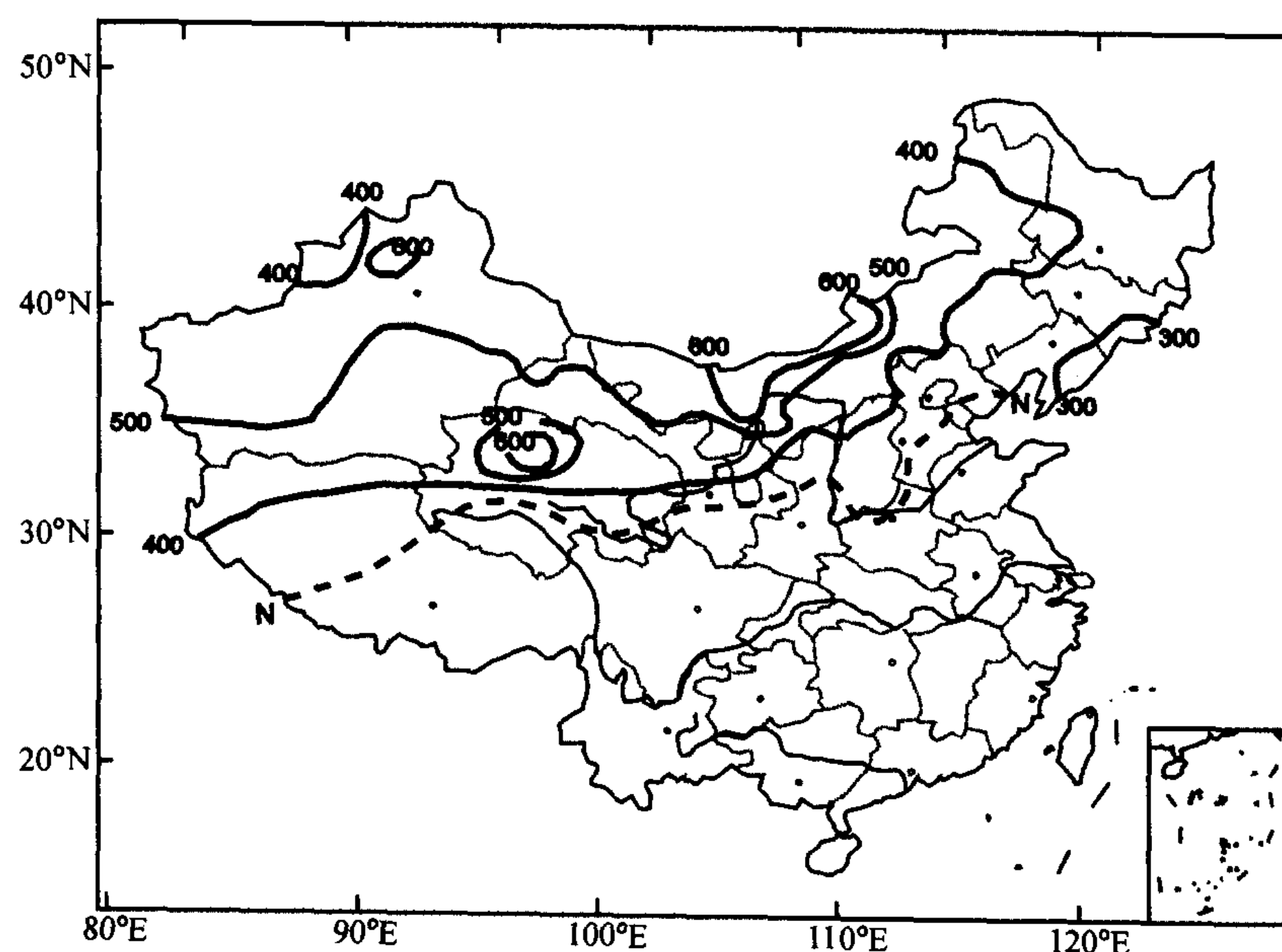


图7 我国春小麦生育期需水量分布 (单位: mm)

看 在 图 中 “N” 线 以 南 的 大 部 分 地 区 均 可 种 植 ， 但 长 江 以 南 地 区 种 植 很 少 ， 棉 花 主 要 集 中 在 华 北 、 西 北 ， 尤 其 新 疆 地 区 是 我 国 主 要 的 优 质 棉 产 区 之 一 。 由 图 9 可 见 ， 棉 花 最 大 实 际 蒸 散 和 其 他 作 物 一 样 也 是 随 着 气 候 变 干 而 增 大 ， 由 南 向 北 逐 渐 增 加 ， 蒸 散 量 在 300~700 mm 之 间 。 由 图 10 可 见 ， 黄 河 以 南 大 部 分 地 区 水 分 订 正 系 数 为 1 ， 水 分 供 应 能 满 足 棉 花 生 长 发 育 的 需 要 ， 越 向 北 水 分 订 正 系 数 越 小 ， 新 疆 绝 大 多 数 地 区 在 0.1 以

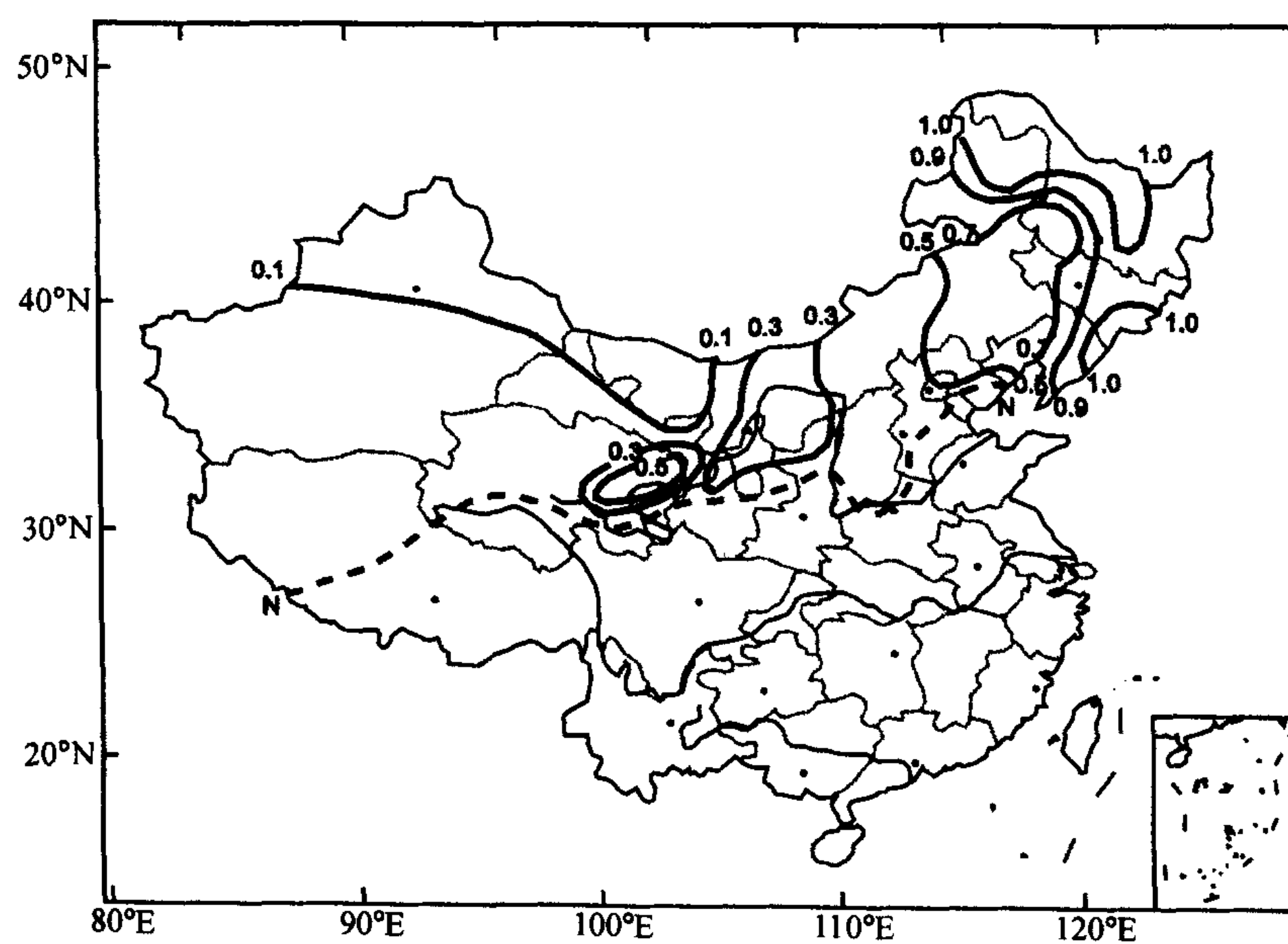


图 8 我国春小麦生育期水分订正系数分布

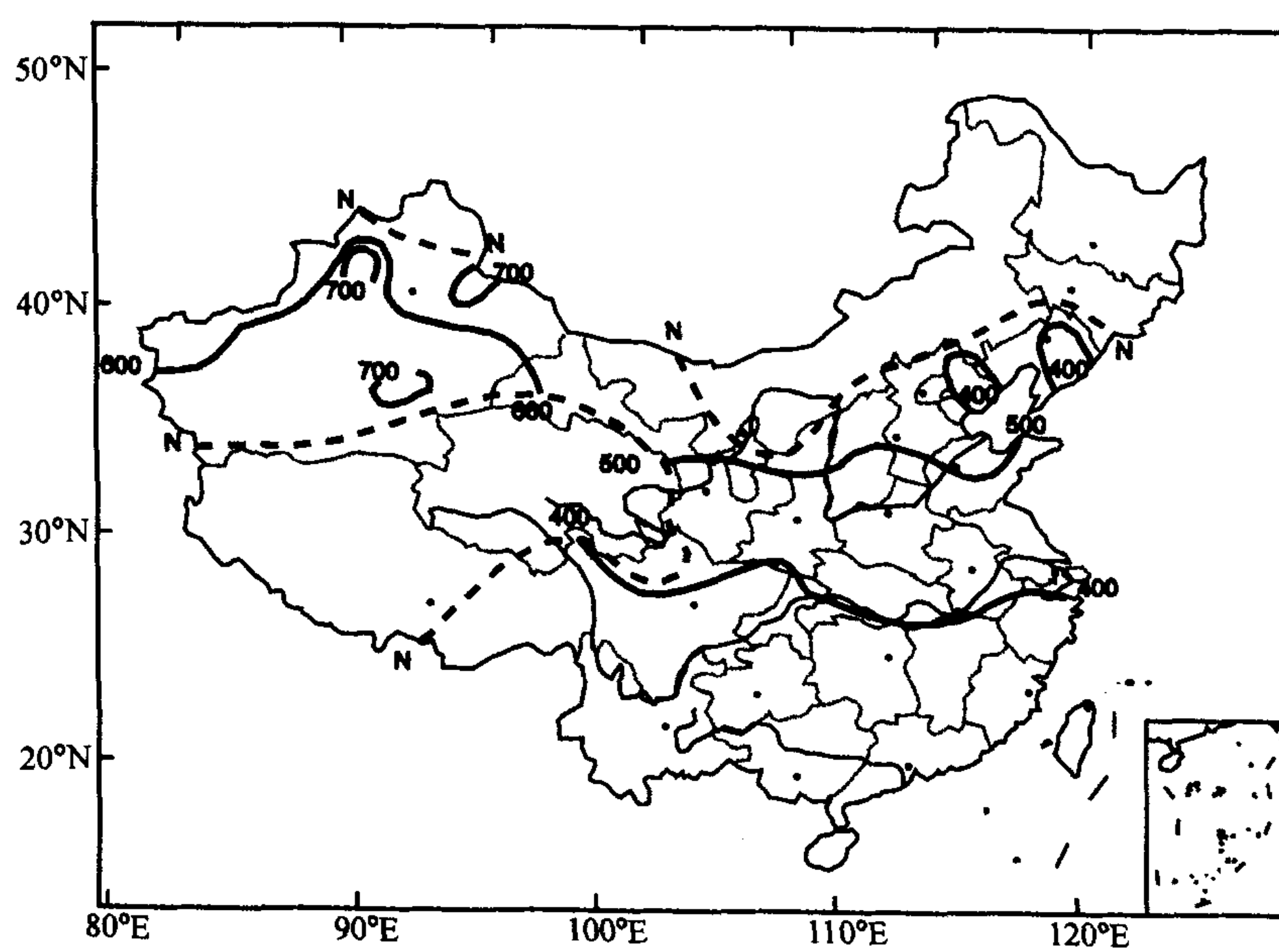


图 9 我国棉花生育期需水量分布 (单位: mm)

下, 新疆的优质棉区光温条件好, 但水分全靠灌溉。

4 改善对策

本文计算分析结果表明, 春、夏玉米的生育期处在我国光、热、水条件优越的季

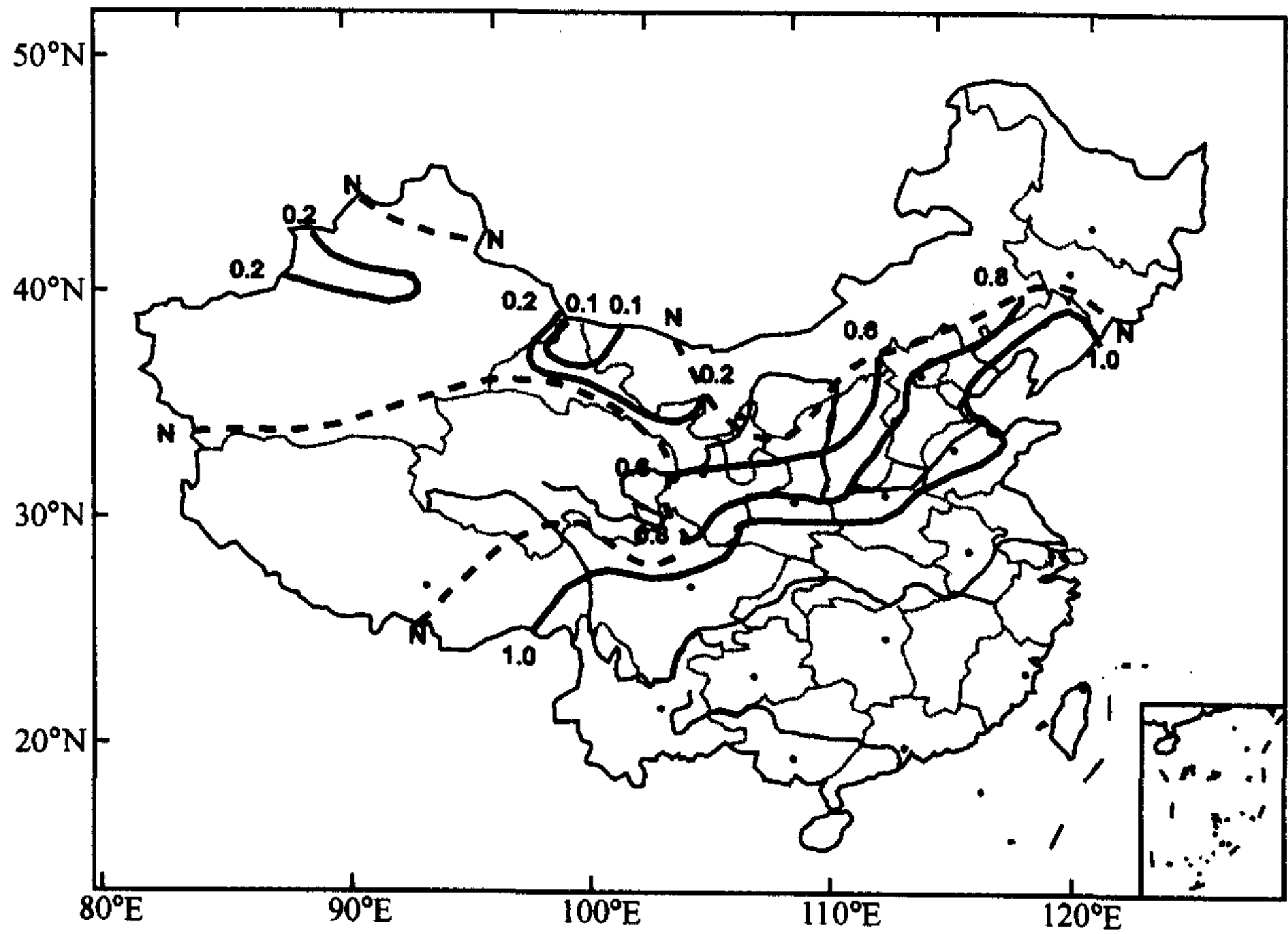


图 10 我国棉花生育期水分订正系数分布

节，生产潜力大。但黄河流域拔节—抽雄期降水少，易出现“卡脖旱”；北部降水变率大，不稳产；西北内陆地区降水量变率大，降水稀少，无灌溉条件，不能达到高产和稳产；西南地区降水量变率小，降水量过多的地区也不易高产。棉花种植区内，黄河以北均为水分亏缺区，而小麦生产中缺水现象则非常普遍。

鉴于我国水资源短缺，农田缺水严重和农村生态环境恶化的现状，我们应转变陈旧的观念，把以追求粮食产量为单一目标的种植活动与发展农村经济、提高资源利用效率、节约用水、保护土地资源、改善生态环境和实现可持续发展等目标结合起来，实施以下改善措施：

(1) 调整产业结构

应因地制宜，保护良田，坡度大于 25°，水分亏缺严重的地区应改种气孔阻力较大、蒸腾作用较小的草或林，这样可达到缓解干旱化的目的。

(2) 推广和发展旱作农业技术

科学技术是第一生产力。要依靠科学技术来提高资源的利用率和经济效益，减少灾害影响，保护环境。在干旱半干旱地区，可采取选择种植抗旱作物及抗旱品种、秸秆覆盖以减少地表蒸发等措施。

(3) 集流积水、节水灌溉

在干旱半干旱地区，准备集水面，如沥青路面、人工覆盖集水面，集水效率可达 75% 以上，集流积水可用于灌溉。节水灌溉工程可使宝贵的水资源得到更好的利用，在农田缺水的关键期实施沟灌、低压管道输水、喷灌、滴灌、渗灌等节水灌溉技术以缓解旱情。

(4) 人工增雨

造成水资源短缺和干旱灾害的主要原因是自然降水量偏少及土壤含水量下降而得

不到补充所致。自然降水量只相当于天空云水量的 30%~50%，世界上有几十个国家开展了人工增雨实验研究和外场作业，可增加雨量 15%。我国华北地区、山东及西北部分地区上空云水资源丰富，在具备人工增雨作业条件的缺水时段，可开展抗旱型人工增雨作业。根据本文模型计算表明，增雨 15%可使甘肃天水地区冬小麦田生育期水分满足程度提高 34%，可有效缓解旱情。另外，一些部门已开展蓄水型人工增雨的研究和实验，取得了较好效果^[13]。

5 结语

(1) 计算作物可能蒸散量是计算作物水分亏缺的最基本途径。本文采用 FAO Penman-Monteith 方法计算，该方法与其他几种常用方法比较，精度较高^[9]，这为作物实际最大蒸散及水分订正系数的计算打下了良好的基础。经过对我国 5 种主要旱地作物需水量的计算和分析，表明其计算结果与生产实践比较符合，具有一定实用性。

(2) 本文计算结果表明，气候条件对不同作物生产影响不同，比如小麦生育期内普遍严重缺水，玉米在生育期水分供应比较充足，但在山西陕西等地，夏玉米的播种期、出苗期及拔节期（6~8 月），也存在明显的水分亏缺现象。

(3) 作者针对我国北方农田干旱严重、水分供需很不平衡的情况，提出了 4 种改善建议。在农业生产实践中，应因地制宜，将提高粮食产量和合理利用水资源、保护生态环境联系起来，以达到可持续发展的目的。

参 考 文 献

- 1 中国科学院台站网络“农作物耗水量研究”课题组，作物与水分关系研究，北京：中国科学技术出版社，1992.
- 2 钟兆站、赵聚宝、郁小川等，中国北方主要旱地作物需水量的计算与分析，中国农业气象，2000，5，1~4.
- 3 李临颖，冬小麦农田日蒸散量的计算，应用气象学报，1992，2，248~253.
- 4 陈玉民等，中国主要作物需水量与灌溉，北京：水利电力出版社，1995.
- 5 张书余，河北省自然降水和水资源盈亏，华北干旱预测研究进展，北京：气象出版社，1999，135~140.
- 6 林耀明、任鸿遵、于静洁等，华北平原的水土资源平衡研究，自然资源学报，2000，3，252~258.
- 7 郑永红、王守荣，西北干旱区水资源供需分析与可持续利用对策研究，气候与环境研究，2003，1，52~59.
- 8 Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith, Crop evapotranspiration, FAO Irrigation and Drainage Paper 24, Rome, 1998.
- 9 毛飞、张光智、徐祥德，参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较，应用气象学报，2000，11（增刊），128~136.
- 10 高素华主编，中国三北地区农业气候生产潜力及开发利用对策研究，北京：气象出版社，1995，36.
- 11 杜林博斯、A. H. 卡萨姆，产量与水的关系，联合国粮食及农业组织，1979，28~29.
- 12 崔读昌、刘洪顺、闵谨如、贺菊美，中国主要农作物气候资源图集，北京：气象出版社，1984.
- 13 王广河、姚展予，人工增雨综合技术研究，应用气象学报，2003，3（增刊），1~10.

The Analysis of Water Supply and Demand for Crops of Dry Cropland in China and Improving Countermeasures

Li Yinglin^{1,2)}, Gao Suhua³⁾, and Guo Jianping³⁾

- 1) (*Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences; START Regional Center for Temperate East Asia, Beijing 100029*)
- 2) (*Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039*)
- 3) (*Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081*)

Abstract A model for calculating and evaluating water of croplands was established, and by using the crop and meteorological data of 1961~2000, the water requirement of five kinds of crops in China was calculated, which are spring corn, summer corn, spring wheat, winter wheat, and cotton, and their distributing law was discussed. The satisfied degree of water demands for the above crops, were evaluated by water correction factor. The results indicate that the climate has different effect on different crops, for example, wheat is short of water severely during its all growth period, however, the water supply is ample to the production of spring corn, except in April, May, and June, which is the time of planting, emergence and jointing for spring corn. Some measures such as relevant planting technology, saving irrigation and manual rainfall were brought forward to improve the imbalance of water supply and demands of cropland in the northern China.

Key words: crops of dry cropland; water supply and demand; distributing law