

甘肃省小麦水分平衡及其时空分布模式

杨艳昭^{1,2}, 封志明¹, 林耀明¹

(1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 以县域为基本单元, 采用农田水量平衡模型, 对甘肃省 1961 至 2001 年冬、春小麦自然降水条件下的水分平衡进行了逐月计算, 并对其时空分布模式进行了研究。结果表明: 甘肃省多年平均冬小麦需水量为 464.47mm, 亏水量 144.42mm, 盈水量 3.75mm; 春小麦需水量为 443.83mm, 亏水量 262.87mm, 盈水量 0.00mm。降水不能满足小麦生长的需求, 亏水是其水分平衡的首要特征; 5~6 月是甘肃省冬、春小麦的亏水高峰期, 且冬小麦盈亏水量的稳定性低于春小麦; 全生育期冬小麦以中度水分亏缺频率为最高, 春小麦则以重度为主; 甘肃省冬、春小麦的需水量、亏水量与水分亏缺率均呈由东南向西北递增的趋势。

关 键 词: 水分平衡; 亏水量; 水分亏缺频率

文章编号: 1000-0585(2005)06-0853-07

农田水量平衡是一定时段内水分加入、移出或贮存于一段土体中的情况。掌握农田水量平衡规律, 对于制定农田灌溉计划、调整作物种植结构、提高水分利用效率等具有重要意义^[1,2]。近年来, 国内外众多学者对区域农田水分平衡状况进行了研究, 对作物的耗水特性、作物需水与降水的时空耦合特征以及作物水分与粮食产量的关系均有了一定的认识^[3~5], 但研究多集中于以实验为基础的小片田块之内, 区域尺度上的系统研究并不多见。

甘肃省位于 32°31'N~42°57'N 和 92°13'E~108°46'E 之间, 在综合自然区划中处于东部季风区、青藏高原区和西北干旱区 3 大自然区交汇处。该省大部分地区为半干旱和干旱气候, 多年平均降水量为 40~800mm, 地域间差异显著, 同时甘肃省雨季集中, 夏季降水占全年雨量的 75% 以上。水资源短缺已成为甘肃省农业发展的首要限制因子^[6]。小麦是甘肃省主要粮食作物之一。据统计, 2001 年全省春小麦播种面积 $2.77 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 冬小麦播种面积 $4.70 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[7], 二者合计占全省粮食作物播种面积的 42.18%。甘肃省春小麦主要分布于陇西和河西地区, 冬小麦主要分布于陇东和陇南地区^[8]。

鉴于农田水量平衡的研究现状及甘肃省农业生产面临的问题, 为合理利用有限的水资源, 促使区域粮食的稳产高产, 本文以县域为基本研究单元, 采用农田水量平衡模型, 定量分析了甘肃省春小麦和冬小麦水分平衡状况, 并对其时空分布模式进行了探讨。

1 资料收集及处理

本研究过程中所需的气象数据取自国家气象局数据中心, 主要包括温度、降水、日照等气象要素的月值及 1m 土层的土壤湿度日值, 其年限均为 1961~2001 年。对于各气象要素, 分别采用 OIDW (距离反比法) 及 OGIDW (梯度距离反比法) 等方法对其进行插

收稿日期: 2005-03-10; 修订日期: 2005-07-01

基金项目: 中科院知识创新重要方向性项目 KZCX3-SW-333。

作者简介: 杨艳昭 (1977), 女, 辽宁朝阳人, 博士后。主要从事区域水土资源平衡与可持续发展研究。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

值生成 $30' \times 30'$ 的栅格数据^[9], 最终以县域为基本单元进行汇总。

2 农田水量平衡模型的建立与应用

2.1 农田水量平衡模型

水量平衡法是研究农田水量平衡的基本方法, 它的理论基础是物质守恒定律, 即对于某一地块而言, 在给定时段内输入水量与输出水量之差就等于同期土壤储水量的变化量^[10~12]。自然降水条件下农田水量平衡模型如式 1 所示:

$$P_t + S_{t-1} - Q_{St} - K_c \times ET_t = S_t + (Q_{up} - Q_{uc})_t + \eta \quad (1)$$

式中: P_t 为平衡时段 (t) 的降水量; t 对应于作物生育期的月份序数; S_{t-1} 为平衡时段前期的土壤水含量; Q_{St} 为平衡时段末期的产流量, 由降水-径流关系得到; K_c 为 t 时段的作物系数; ET_t 为时段的参考蒸散量; S_t 为 t 时段的土壤水含量; $(Q_{up} - Q_{uc})_t$ 为 t 时段内降水入渗量与毛管上升水量之差; η 为 t 时段的误差项。

式 (1) 表明, 平衡时段的降水量与土壤前期含水量之和, 减去作物需水量和地表产流量之后, 其平衡项为同期的土壤含水量、降水入渗补给地下水量与毛管上升量之差以及误差项三者之和。

2.2 边界条件的假定

令 $BL_t = S_t + (Q_{up} - Q_{uc})_t + \eta$, 土壤最大有效持水量为 ST_{max} ; 农田的亏水量为 DEF_t , 盈水量为 PLU_t , 则根据蓄满产流原理, 区域农田水量的盈、亏量和土壤含水量有 3 种可能情况:

- ①当 $BL_t > ST_{max}$ 时: $DEF_t = 0$ $PLU_t = ST_t - ST_{max}$ $ST_t = ST_{max}$
- ②当 $0 < BL_t \leq ST_{max}$ 时: $DEF_t = 0$ $PLU_t = 0$ $ST_t > 0$
- ③当 $BL_t \leq 0$ 时: $DEF_t = ST_t - BL_t$ $PLU_t = 0$ $ST_t \geq 0$

2.3 主要参数的确定

作物需水量是农田水量平衡中的重要因子, 本研究采用联合国推荐的 Penmar Monteith 方法^[13~15] 对小麦的参考作物蒸散量进行了计算。由于甘肃省县域之间农气要素差别很大, 为提高研究精度, 将全省划分为青北高原区、河西走廊区、陇中黄土区、盆周山地与陕甘黄土区 5 个生态区, 作物生育期以及作物系数的选取均以生态区为单元进行, 其中作物系数值来源于甘肃省农科院。土壤初期含水量 (ST_0) 与最大有效含水量 (ST_{max}) 是平衡过程中两个重要的因子, 直接反映土壤调蓄能力的高低, 研究中对于这两个因子也是以生态区为单元进行计算, 基础数据源于国家气象局数据中心。由于大多数作物对土壤水的利用均集中于 0~100cm 土层^[16], 因此本研究土体厚度均为 1m。

根据上述假定条件, 利用 Visual Foxpro 语言设计计算流程, 即可定量计算甘肃省小麦 1961~2001 年逐月的农田水量盈亏值。计算过程中, 所有县域单元、所有作物的初始月份均为 1961 年 1 月, 终止月份皆为 2001 年 12 月。

3 小麦水分平衡时间分布特征

3.1 多年平均需水量及其变化

影响作物需水量的环境因素很多, 主要有农业和气象两方面。前者包括农作物本身, 如品种、生长状况和耕作栽培措施等, 后者主要包括了温度、湿度、日照等因子^[17]。甘肃陇东、陇中黄土高原冬小麦一般在 9 月中旬~10 月上旬播种, 次年 6 月中下旬收获。

整个生育期一般为 250~ 300 天左右。春小麦 3 月中旬播种, 当年 7 月收获, 其生长期在 130 天左右。全省多年平均逐月需水量及其变化情况见表 1。

从表 1 可见, 抽穗、灌浆期的 5~ 6 月份是冬小麦的需水关键期, 日需水量值均大于 4mm, 越冬期作物需水量为全生育期最低值, 每天不足 0. 40mm。春小麦 5~ 6 月份为需水关键期, 月需水量在 120mm 以上, 作物生长发育初期的 3 月份是需水量最小的月份。

就各月多年平均需水量的变异系数来看, 从整体上, 冬小麦对环境的敏感性强于春小麦, 前者年平均变异系数为 5. 63, 后者为 4. 91。冬小麦需水量对环境最敏感的月份为 2 月, 春小麦为 3 月。尽管冬小麦的越冬期与春小麦的生长发育初期需水量较小, 但因其对环境较为敏感, 制定灌溉计划时应予以考虑。

表 1 多年平均需水量及其变化
Tab 1 Multi-year mean water demand and change

小麦需水量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
冬 需水量(mm)	11. 13	13. 48	22. 67	57. 13	121. 34	123. 34	-	-	47. 62	33. 92	22. 16	11. 81	464. 47
小 标准差	1. 48	1. 87	2. 90	5. 65	12. 20	12. 11	-	-	4. 66	3. 30	2. 16	1. 26	26. 16
麦 变异系数(%)	13. 32	13. 88	12. 79	9. 89	10. 06	9. 81	-	-	9. 78	9. 73	9. 77	10. 70	5. 63
春 需水量(mm)	-	-	28. 79	66. 97	131. 31	124. 60	92. 16	-	-	-	-	-	443. 83
小 标准差	-	-	2. 85	5. 23	10. 25	9. 45	5. 40	-	-	-	-	-	21. 79
麦 变异系数(%)	-	-	9. 91	7. 81	7. 81	7. 58	5. 86	-	-	-	-	-	4. 91

注: “-” 为非生长期。下同。

3.2 多年平均亏水量及其变化

经自然降水条件下的农田水量平衡计算, 可得到各个县域单元逐月的盈水量、亏水量、土壤水变化量等系列数值。对全省 86 个县、41 年逐月的盈、亏水量以县域小麦播种面积为权重进行汇总, 得到甘肃省小麦多年平均盈、亏水量 (表 2)。

甘肃省冬小麦一般在雨季后播种, 次年雨季来临前收获, 整个生育期恰好处于一年中的少雨时期, 因此, 多年平均各月水分平衡均以亏水为主要特征, 全生育期亏水量为 144. 42mm, 盈水量仅为 3. 75mm。对不同的月份, 作物生长发育初期的 9~ 10 月是盈水量最多的月份, 需水关键期的 5~ 6 月是亏水高峰期。

表 2 小麦多年平均盈 (亏) 水量表
Tab 2 Annual mean water deficit and surplus of wheat

小麦需水量	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	生育期
亏水量(mm)	-4. 34	-5. 00	-4. 81	-16. 34	-48. 17	-46. 67	-	-	-1. 38	-2. 31	-6. 52	-5. 46	-144. 42
冬 盈水量(mm)	0. 00	0. 00	0. 00	0. 05	0. 00	0. 00	-	-	1. 99	1. 57	0. 10	0. 03	3. 75
小 标准差	2. 66	3. 44	4. 07	12. 04	27. 08	25. 59	-	-	8. 34	8. 08	4. 94	3. 19	55. 69
麦 变异系数(%)	61. 34	68. 82	84. 66	73. 69	56. 21	54. 72	-	-	605. 90	349. 01	75. 80	58. 49	38. 56
亏水量(mm)	-	-	-18. 68	-46. 33	-91. 72	-76. 25	-29. 89	-	-	-	-	-	-262. 87
春 盈水量(mm)	-	-	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	0. 00	-	-	-	-	-	0. 00
小 标准差	-	-	6. 16	10. 88	24. 27	22. 23	15. 09	-	-	-	-	-	43. 16
麦 变异系数(%)	-	-	32. 97	23. 48	26. 46	29. 15	50. 50	-	-	-	-	-	16. 42

春小麦 3 月中旬播种, 当年 7 月收获。虽然春小麦生长恰为甘肃省降水集中的月份, 但是陇东, 特别是河西地区是甘肃省降水量最少的地区, 敦煌年平均降水量仅为 38. 7mm。因此, 春小麦对水分更为敏感, 生长发育过程中无盈水量出现, 多年平均亏水量高达

262 87mm。5~ 6 月同样是春小麦的缺水高峰期。

就水量盈亏的稳定性来讲, 冬小麦的稳定性较春小麦差, 全生育期平均变异系数为 38 56%。同时, 冬小麦生长的各个阶段变异系数的差异也很大, 9 月份冬小麦的需水量不多, 降水量适中, 水分平衡结果有盈有亏, 其变异系数高达 605 90%, 而 6 月份 41 年均为亏水, 其变异系数仅为 54 72%。相对而言, 春小麦月际之间稳定性差异较小, 生育期平均值为 16 42%。对于水量盈亏稳定性较差的月份, 制定灌溉计划时应给予考虑。

3 3 多年水分亏缺频率

作物需、亏水量受多种因素的综合影响, 并不是一个固定不变的值^[18~ 20]。作物种类不同需、亏水量不同; 同一作物品种在不同的生长发育阶段, 其需、亏水量也是不同的。鉴于甘肃省多年农田水分平衡以亏水为主, 我们对其逐月的亏水情况进行了更深入地探讨。

令

$$\lambda = \frac{def_i}{dem_i}$$

(2)

式中: λ 为水量亏缺指数, i 为月份, def 为亏水量, dem 为需水量。依据前人研究^[17], 将 λ 分为五级, 即 $\lambda \leq 0.10$ 为正常, $0.25 \geq \lambda > 0.10$ 为轻度, $0.50 \geq \lambda > 0.25$ 为中度, $0.75 \geq \lambda > 0.50$ 为重度, $\lambda > 0.75$ 为极度, 则根据 41 年水分平衡可得到冬、春小麦各月水分亏缺发生的频率。

由表 3 可以看出, 冬小麦在不同月份各等级水分亏缺发生的频率显著不同。越冬期三个月的水分亏缺总频率均较高, 表明冬前保持土壤墒情具有重要意义。5、6 月份正值冬小麦拔节—抽穗和抽穗—灌浆期, 其水分亏缺总频率和重度水分亏缺频率均高于其他生育阶段。由此表明, 这两个月份不仅水分亏缺程度严重, 而且水分亏缺发生的频率也很高。从表中还可看出, 冬小麦各月水分亏缺发生频率的分布特征也有所不同, 从全生育期看, 以中度水分亏缺发生频率为最高, 9、10 月份, 以轻度水分亏缺发生频率最高。

由表 3 可见, 甘肃省春小麦在不同生育阶段的亏水总频率均在 0.90 以上, 亏水十分严重。同时, 除 7 月份外, 各生育阶段水分亏缺发生频率的分布特征均是以重度频率为主。由此表明, 甘肃省春小麦不仅水分亏缺程度严重, 而且其发生频率也较冬小麦高。

表 3 小麦多年水分亏缺频率

Tab 3 multi-year mean deficit ratio of wheat														
		1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	生育期
冬 小 麦	总频率	0.99	0.92	0.66	0.81	0.89	0.93	—	—	0.23	0.38	0.77	0.75	1.00
	轻 度	0.28	0.23	0.28	0.33	0.10	0.23	—	—	0.18	0.25	0.23	0.15	0.35
	中 度	0.48	0.48	0.33	0.33	0.53	0.45	—	—	0.05	0.10	0.43	0.38	0.63
	重 度	0.13	0.13	0.05	0.15	0.23	0.25	—	—	0.00	0.03	0.08	0.12	0.03
	极 度	0.10	0.08	0.00	0.00	0.03	0.00	—	—	0.00	0.00	0.03	0.10	0.00
春 小 麦	总频率	—	—	1.00	1.00	1.00	1.00	0.93	—	—	—	—	—	1.00
	轻 度	—	—	0.05	0.00	0.03	0.00	0.25	—	—	—	—	—	0.00
	中 度	—	—	0.18	0.13	0.10	0.20	0.60	—	—	—	—	—	0.10
	重 度	—	—	0.45	0.50	0.53	0.65	0.08	—	—	—	—	—	0.90
	极 度	—	—	0.33	0.38	0.35	0.15	0.00	—	—	—	—	—	0.00

4 小麦水分平衡空间分布规律

4 1 小麦需水量空间分布

小麦作为甘肃省最主要的粮食作物, 播种面积占粮食作物总播种面积的 42.18%。由

于各地小麦生育期内需水量及降水量的时空分布不同,因而造成了小麦水分盈亏量的地域差异。研究过程中,对小麦水分平衡的空间分布规律进行了探讨。

图 1 为全省小麦多年平均需水量图。从图中可以看出,随着纬度、日照时数的增加,冬、春小麦需水量均具有从东南向西北递增的趋势。酒泉市冬小麦的需水量为 562.06mm,位居全省第一,夏河县为 380mm,需水量最小。对于春小麦,需水量最小的碌曲县为 335mm,最大的敦煌市,高达 630mm。

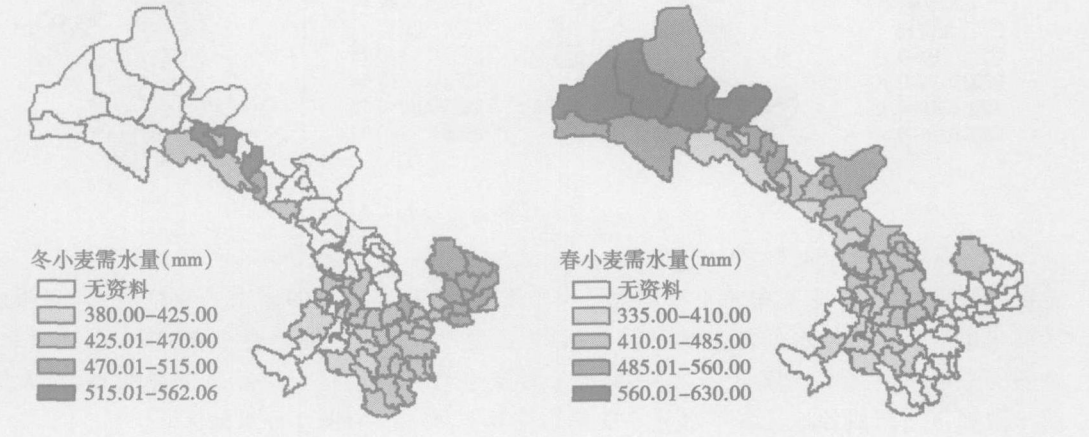


图 1 多年平均需水量分布图

Fig 1 Multi year mean water demand in Gansu province

4 2 小麦亏水量空间分布

图 2 为甘肃省小麦多年平均亏水量图。甘肃省降水量由东南向西北递减,小麦的需水量自东南向西北递增,由此导致其亏水呈东南向西北递增的趋势。从图 2 可以看出,全省冬小麦的亏水量由 38.81mm 增至 484.44mm,县域之间差异明显。其中,亏水量最小的县为甘南地区的迭部县,最大值位于酒泉市。对于春小麦,全省的亏水量由甘南地区碌曲县的 45.00mm 增至敦煌市的 578.18mm,地域差异显著。

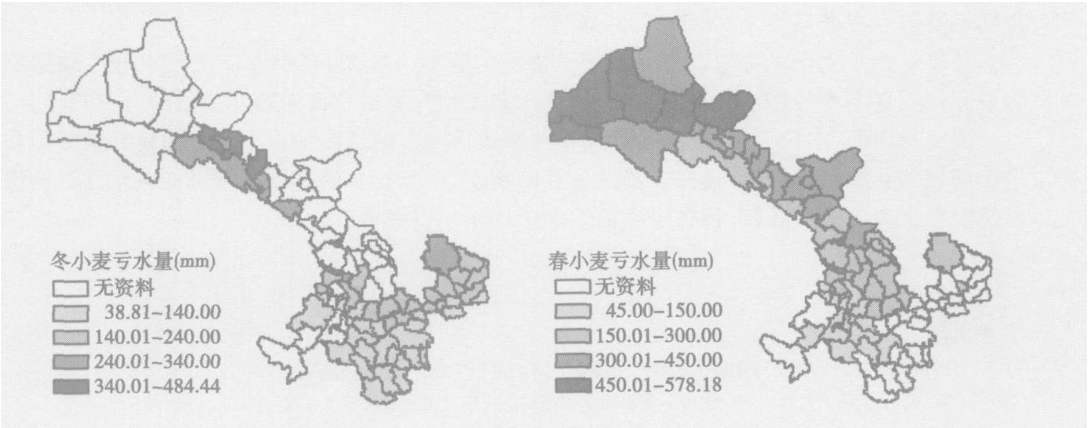


图 2 多年平均亏水量分布图

Fig 2 Multi year mean water deficit in Gansu province

图 3 为甘肃省小麦多年平均水分亏缺率图。从图可,无论是冬小麦还是春小麦,水分亏缺率均呈由东南向西北递增的分布规律,且冬小麦的亏缺率小于春小麦。对于冬小麦,陇南

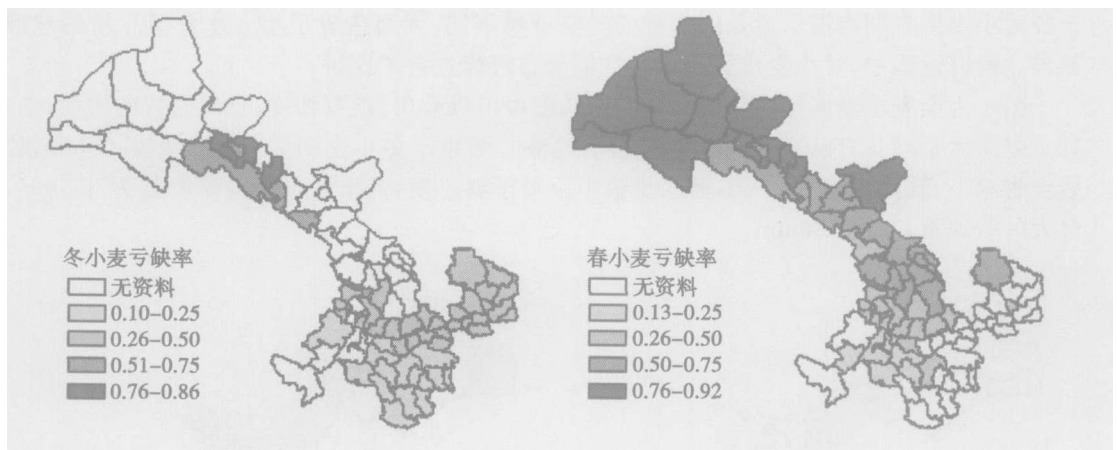


图 3 多年平均水分亏缺率分布图

Fig 3 Multi year mean water deficit rate in Gansu province

地区为轻度亏水, 陇东陇中黄土高原地区为中度亏水, 祁连山地的肃南为重度亏水, 河西地区酒泉市的多年平均水分亏缺率高达 0.86, 为极度亏水地区。对于春小麦, 从东南到西北, 全省的亏缺率由 0.13 增至 0.92, 其中, 水分亏缺率最小的县是甘南地区的碌曲县, 最大值位于敦煌市。河西各地区多年水分亏缺率均在 0.75 以上, 为极度亏水地区。

5 结论与讨论

本文以县域为基本单元, 采用农田水量平衡模型, 对甘肃省 1961~ 2001 年冬、春小麦自然降水条件下的水分平衡进行逐月计算, 并对其时空分布模式进行研究, 结果表明:

自然降水条件下, 甘肃省多年平均冬小麦需水量为 464.47mm, 亏水量为 144.42mm, 盈水量为 3.75mm; 春小麦需水量为 443.83mm, 亏水量为 262.87mm, 盈水量为 0.00mm。降水不能满足小麦生长的需求, 亏水是甘肃省小麦生产的首要特征。

5~ 6 月是甘肃省小麦的亏水高峰期, 且冬小麦盈亏水量的稳定性低于春小麦, 前者生育期平均盈亏变异系数为 38.56%, 后者为 16.42%。

甘肃省冬小麦全生育期以中度水分亏缺发生频率为最高, 春小麦以重度水分亏缺频率为最高; 冬、春小麦的需水量、亏水量与水分亏缺率均呈现由东南向西北递增的分布规律。

因资料限制, 本研究对作物生育期、作物系数等参数的选取均以生态区为单元进行。如果能细化到县域尺度, 将会进一步提高研究的精度。同时, 本研究没有考虑土壤水分的侧渗以及垂直方向的变异, 有待在今后的工作中逐步加以完善。

参考文献:

[1] 李开元, 李玉山. 黄土高原农田水量平衡研究. 水土保持学报, 1995, 9(2): 39~ 44
[2] 李保国, 龚元石, 左强, 等. 农田土壤水的动态模型及应用. 北京: 科学出版社, 2000.
[3] 张晓煜, 五连喜, 李凤霞, 等. 宁夏扬黄新灌区春小麦灌溉定额研究. 干旱地区农业研究, 1999, 17(3): 74~ 80
[4] 刘昌明, 等. 小麦水分生产函数及其效益的研究. 地理研究, 2005, 24(1): 1~ 10
[5] 谢云. 黄土高原地区农田土壤水分模型及其对农作物的影响. 地理研究, 1997, 16(增刊): 122~ 126
[6] 李栋梁, 刘德祥, 主编. 甘肃气候. 北京: 气象出版社, 2000

- [7] 甘肃统计局. 甘肃农村经济年鉴(2002). 北京: 统计出版社, 2002
- [8] 邓振镛, 尹东, 张毅. 甘肃省小麦生态气候适生种植区的研究. 气象科技, 2000, (1): 36~ 40
- [9] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 气象要素空间插值方法优化. 地理研究, 2004, 23 (3): 357~ 364
- [10] 龚元石, 李宝国. 应用农田水量平衡模型估算土壤水渗漏量. 水科学进展, 1995, 6 (1): 16~ 21.
- [11] 林耀明, 任鸿遵, 于静洁, 姚治君. 华北平原水土平衡研究. 自然资源学报, 2000, 15 (3): 253~ 258.
- [12] 由懋正, 王会肖. 农田土壤水资源评价. 北京: 中国农业出版社, 1996
- [13] FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation and drainage paper 56 Rome: FAO Food and Agriculture Organization, 1998
- [14] Rana G, Katerj Ni A measurement based sensitivity analysis of the Penmar Monteith actual evapotranspiration model for crops of different height and in contrasting water status. Theoretical and Applied Climatology, 1998, 60: 141~ 149
- [15] 封志明, 杨艳昭, 丁晓强, 等. 甘肃地区参考作物蒸散量时空变化研究. 农业工程学报, 2004, 20 (1): 99~ 103
- [16] 王树安, 王会肖. 作物栽培学各论. 北京: 气象出版社, 1994
- [17] 赵松岭 主编. 集水农业引论. 西安: 陕西科学技术出版社, 1996
- [18] 赵聚宝, 李克煌 主编. 干旱与农业. 北京: 中国农业出版社, 1995
- [19] 赵宏谊, 马鹏星, 杨兴国, 等. 甘肃省主要农作物需水量时空变化特征分析. 干旱地区农业研究, 2005, 23(1): 39~ 44
- [20] 刘昌明, 周长青, 张士峰, 等. 小麦水分生产函数及其效益的研究. 地理研究, 2005, 24 (1): 1~ 10

Wheat water balance and its distribution in Gansu province

YANG Yan-zhao^{1,2}, FENG Zhi-ming¹, LIN Yao-ming¹

(1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Gansu province located in northwest China has an arid and semi-arid climate with an annual mean precipitation of 40-800mm. Deficiency of water resources has become the major factors restricting the agricultural development in Gansu province. Using field water balance model, monthly field wheat water balance has been estimated for 80 counties in the province for a period of 1960-2001. Deficit ratio and frequency were adopted to analyze spatial-temporal distribution of field water resources balance. The results show that under normal precipitation condition, rainfall cannot meet water demand for wheat, and that water deficit is the main character of field water resources balance in Gansu. Deficit of field water resources tends to increase from southeast to northwest, and from mountains to basins, varying significantly among the counties studied. Results show that water demand for winter wheat is 464.47 mm, the corresponding water deficit is 144.42 mm and the surplus water is 3.75 mm. As for spring wheat, water demand is 443.83 mm, the corresponding water deficit is 262.87 mm and the surplus water is zero mm. Water deficit of spring wheat is higher than that of winter wheat. Deficit water reaches the largest amount in May and July for both types, but the stability of water deficit for winter wheat is lower than spring wheat. For winter wheat, the highest frequency of water deficit is media, while it is more severely for spring wheat.

Key words: field water balance; deficit water; frequency of water deficit.