

20 世纪 90 年代 LUCC 过程对中国农田 光温生产潜力的影响*

——基于气候观测与遥感土地利用动态观测数据

刘纪远 徐新良 庄大方 高志强

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要 在 20 世纪 90 年代中国气候观测数据和遥感土地利用动态观测数据的支持下, 计算了中国 20 世纪 90 年代农田光温生产潜力的变化. 结果表明: 20 世纪 90 年代的 LUCC 过程直接导致了全国农田光温生产潜力总量和区域分布的变化, 总体趋势是南减北增, 总量净增加 2622 万吨; 在各种土地利用类型之间的相互转变和转化过程中, 耕地扩张和农田损失是导致全国农田光温生产潜力总量净变化的主要原因, 耕地扩张使全国农田光温生产潜力总量净增加 8335 万吨, 占全国农田光温生产潜力总量的 3.50%, 主要分布在东北、西北和华北等农林、农牧交错区和沙漠绿洲区, 主要是由于该地区大面积的农田开垦所导致; 农田损失使全国农田光温生产潜力总量净减少 5713 万吨, 占全国农田光温生产潜力总量的 2.40%, 主要分布在黄淮海平原、长江三角洲、珠江三角洲、陇中、东南沿海、四川盆地东南部以及乌鲁木齐—石河子一带, 主要是由于该区域经济发展较快, 城市扩张明显, 城乡建设用地大量侵占耕地的缘故.

关键词 土地利用/土地覆盖变化 生产潜力 光合生产潜力 光温生产潜力 光温生产潜力总量

耕地和农业气候资源是决定区域农业发展的两个基本条件. 农田生产潜力不仅取决于农业气候条件, 而且也依赖于农田的数量、质量和种植结构. 对农业生产而言, 气候变化通过改变农作物生长发育进程中光照、热量, 以及光热和水分的匹配状况影响其生产力; 而土地利用/土地覆盖变化(Land-use and

land-cover change, LUCC)则通过直接改变农业土地资源的数量、质量和农业土地利用结构影响农田生产力. 国际地圈生物圈计划(IGBP)和国际全球变化人文因素计划(IHDP)于 1995 年制定并开始执行“土地利用/土地覆盖变化科学研究计划(LUCC)^[1]”, 使 LUCC 研究成为目前全球变化研究的前沿和热点课题.

2004-02-16 收稿, 2004-08-20 收修改稿

* 国家自然科学基金重点项目(批准号: 90202002)、国家重点基础研究发展规划项目(批准号: 2002CB412507)资助

LUCC过程使不同土地类型的适宜性和土地质量发生变化,从而直接影响土地生产力的高低.陈奇伯等利用土地利用方式变化所导致的耕地土壤养分流失和实际粮食产量对比定性分析了农田生产力的变化^[2]; Diana利用土地利用转换模型和GLS方程估算了巴西亚马孙河地区森林砍伐所导致的农田生产潜力下降^[3].

中国陆地面积广大,气候和生态系统复杂多样,土地利用开发程度不一.由于政策和经济因素的影响,20世纪90年代中国各地区的土地利用发生了很大变化.耕地北增南减,总量增加,林草地总体减少,建设用地持续扩张^[4,5].为了分析20世纪90年代LUCC过程对中国农田生产潜力的影响,我们在中国遥感土地利用动态观测数据库1 km×1 km格网土地利用数据的基础上,结合气候观测数据和农田生产潜力计算模型估算了该年代LUCC过程所导致的中国农田光温生产潜力(Photosynthetic Thermal Productivity)的变化.

1 观测数据基础与数据整理

1.1 气象观测数据

本研究的气象数据来自中国气象局671个气象站1990~2000年的气象资料,主要包括每日的辐射、气温等.首先利用上述气象数据合成每旬的平均值,以此作为确定作物生育期长短和计算农田光温生产潜力的基础;由于气象数据都是气象台站的观测数据,还需要对气象数据进行空间化,我们采用样条函数空间插值方法获得上述气象指标1 km×1 km的空间网格数据^[6],然后通过投影变换,将大地投影转变为与土地利用数据具有一致投影基础的双标准纬线等面积割圆锥(Albers)投影.

1.2 遥感土地利用动态观测数据

中国遥感土地利用动态观测数据^[7-11]中的土地利用分类将耕地划分为旱地和水田两个二级类型.我们在研究中采用80年代末期和90年代末期的土地利用数据以及80年代末至90年代末土地利用动态变化数据,首先在GIS环境下从土地利用数据中提取耕地信息和耕地变化信息,并将提取的耕地信息和耕

地变化信息处理转化成1 km×1 km的栅格耕地百分比成分数据.

为了实现遥感土地利用动态观测数据与生产潜力估算模型的有机结合,在计算农田光温生产潜力时,我们基于不同耕地类型——旱地和水田,选择相应的农作物来计算,由于水田主要种植水稻,旱地以玉米、大豆、高粱、谷子等为主,由于难以获取不同作物的空间分布数据,计算时水田全部作为水稻处理,而旱地则以玉米、大豆、高粱、谷子这4类作物的平均生产潜力作为旱地农田的光温生产潜力.在计算农田光温生产潜力时,我们以1 km×1 km栅格作为计算单元.

2 研究方法

在农田生产潜力估算方面,国内外更多的研究侧重于计算气候变化所导致的耕地生产潜力变化,所采用的模型已经比较成熟,可以概括为3类:(1)潜力衰减法,即环境因子逐段订正模型,通过对光合生产潜力→光温生产潜力→气候生产潜力→土地生产潜力几个阶段的逐步订正来计算;(2)气候因子综合法,即经验法,这类模式主要有迈阿密模型、筑后模型、瓦赫宁根(Wageningen)法^[12]和农业生态区域法(AEZ)等,主要利用经验公式来计算生产潜力;(3)作物生长过程模拟方法,此类方法是根据作物光合作用过程、生理生态特性和外界环境因子来计算生产潜力,如CERES模型^[13,14]、EPIC模型^[15,16]、CROPGRO模型^[17,18]等.

农田生产潜力又叫农田的作物生产潜力,是指农田在一定条件下能够持续生产人类所需的生物产品的潜在能力.排除社会经济因素影响,农田生产潜力是由光、热、水、土和作物生物学特性共同决定的,它们相互制约,相互影响,构成农田生产潜力的阶梯系列:光合生产潜力→光温生产潜力→气候生产潜力→农田生产潜力.关于光温生产潜力的计算,国内外已有不少研究^[19-26],传统的方法是采用环境因子逐步订正方法,即先计算出光合生产潜力,再进行温度影响的订正获得作物的光温生产潜力.这种方法从作物光合作用与其环境条件相互关系出发,物理意义清晰,结果可用作时空分布比较.关键技术在于

采用合适的参数和订正函数. 我们在分析前人使用的参数以及订正方案的基础上, 通过在全国范围内对各参数的平衡, 建立了比较合理的温度订正函数.

2.1 光合生产潜力

光合生产潜力是在温度、水分、土壤、品种以及其他农业技术条件都处于最佳状况时, 完全由光合有效辐射决定的生产潜力. 计算公式为

$$Y_1 = Cf(Q) = K\Omega\varepsilon\varphi(1-\alpha)(1-\beta)(1-\rho)(1-\gamma) \cdot (1-\omega)(1-d)sf(L)(1-\eta)^{-1}(1-\delta)^{-1}q^{-1}\Sigma Q_j, \quad (1)$$

式中, Y_1 为光合生产潜力, 单位为 kg/hm^2 ; C 为单位换算系数, K 为面积系数; ΣQ_j 为作物生育期内的太阳总辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); Ω 为作物利用光照强度的效率; ε 为光合有效辐射占总辐射的比例; φ 为光量子转化效率; α 为植物群体反射率; β 为植物繁茂群体透射率; ρ 为作物非光合器官截获的辐射比例; γ 为超过光饱和点光的比例; ω 为呼吸消耗占光合产物的比例; d 为作物茎叶脱落率; s 为作物经济系数; $f(L)$ 为作物叶面积动态变化订正值; η 为成熟谷物的含水率; δ 为灰分率; q 为单位干物质含热量 (MJ/kg); 各参数的取值参照参考文献 [19~24, 27, 28].

2.2 光温生产潜力

光温生产潜力是指在水分、土壤、品种以及其他农业技术条件都处于适宜条件下, 由自然光温条件决定的农作物产量水平, 是灌溉农业的产量上限. 通过在光合生产潜力的基础上进行温度订正, 可得到光温生产潜力. 其计算公式为

$$Y_2 = f(T) \cdot Y_1, \quad (2)$$

式中, Y_2 为光温生产潜力, 单位为 kg/hm^2 ; $f(T)$ 为作物光合作用的温度订正函数. 我们以各种主要农作物生长发育和实现高产的三基点温度指标为基准, 按下式来确定 $f(T)$:

$$f(T) = \frac{(T - T_1)(T_2 - T)^B}{(T_0 - T_1)(T_2 - T_0)^B}, \quad (3)$$

$$B = (T_2 - T_0)/(T_0 - T_1), \quad (4)$$

式中, T 是某一时段的平均气温, T_1 , T_2 和 T_0 分别是该时段内作物生长发育的下限温度、上限温度和产量形

成的最适温度, $f(T)$ 是由 T , T_1 , T_2 和 T_0 决定的值域为 0~1 的不对称抛物线函数, 我们将作物生育期划分为苗期、营养生长期、营养生殖并进期、营养灌浆期和营养成熟期 5 个阶段分别计算 $f(T)$, 各阶段 T_0 , T_1 和 T_2 的取值参照参考文献 [29~31].

3 估算结果分析

3.1 90年代LUCC过程影响下中国农田光温生产潜力变化的空间特征

为了研究 20 世纪 90 年代 LUCC 过程对中国农田光温生产潜力的影响, 我们在假设气候条件不变的前提下, 分析仅由农业土地利用变化所导致的中国农田光温生产潜力变化. 首先计算 90 年代的平均气候条件, 包括作物平均生育期长短、作物生育期内的平均太阳总辐射以及平均气温; 然后结合不同时间段的农田土地利用分类面积数据进行中国农田光温生产潜力及其变化的计算, 进而分析 90 年代 LUCC 过程影响下中国农田光温生产潜力变化的空间特征.

作物生育期的长短是决定作物接受太阳辐射和干物质累积的重要因素. 春季日平均气温稳定通过 10°C 的初日是一般喜温作物生长的开始, 是早稻播种的最低临界温度. 秋季 10°C 的终日是喜温作物停止生长期. 因此大于 10°C 期间是光合作用制造干物质较为有利的时期, 该时期可作为作物生长活跃期. 我们利用 1990~2000 年各年度旬均温的大小来确定作物的生育期, 即旬均温 $\geq 10^\circ\text{C}$ 的一年中的第一旬至最后一旬作为作物的有效生育期. 通过运算我们可以获得由 $\geq 10^\circ\text{C}$ 旬均温划分的中国 90 年代作物平均生育期长短空间分布图(图 1), 然后根据各地生育期的长短分别统计作物生育内的平均太阳总辐射和平均气温.

利用 90 年代作物生育期内的平均太阳总辐射和平均气温, 并结合 80 年代末和 90 年代末两期土地利用数据, 可以分别获得这两个不同时间的农田光温生产潜力空间分布状况(如图 2 和 3 所示), 结合土地利用动态变化数据还可以获得 20 世纪 90 年代由于 LUCC 过程所导致的中国农田光温生产潜力净变化的空间格局(如图 4 和 5 所示).

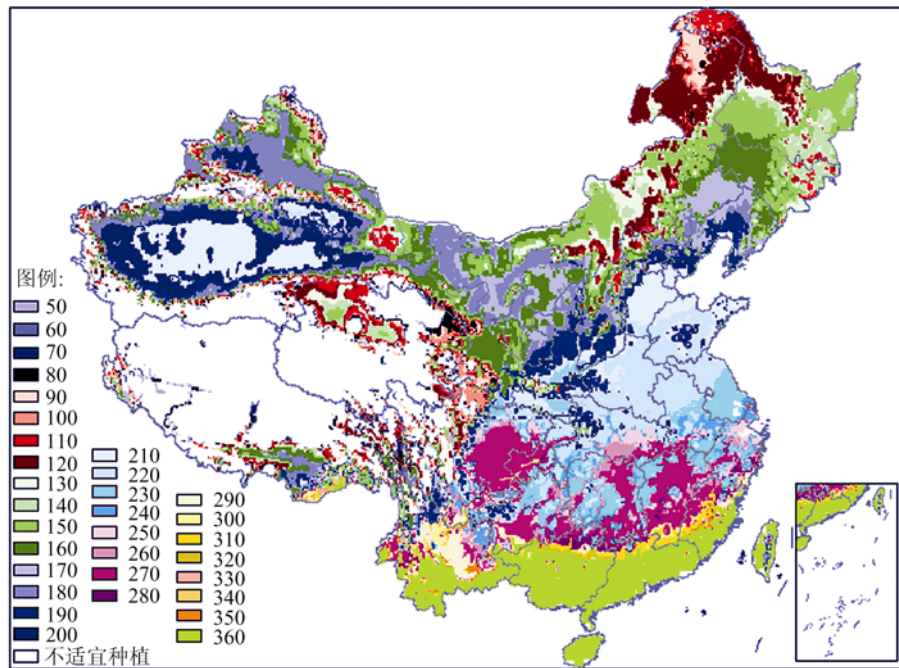


图 1 中国 90 年代农作物生育期的区域差异(单位: d)

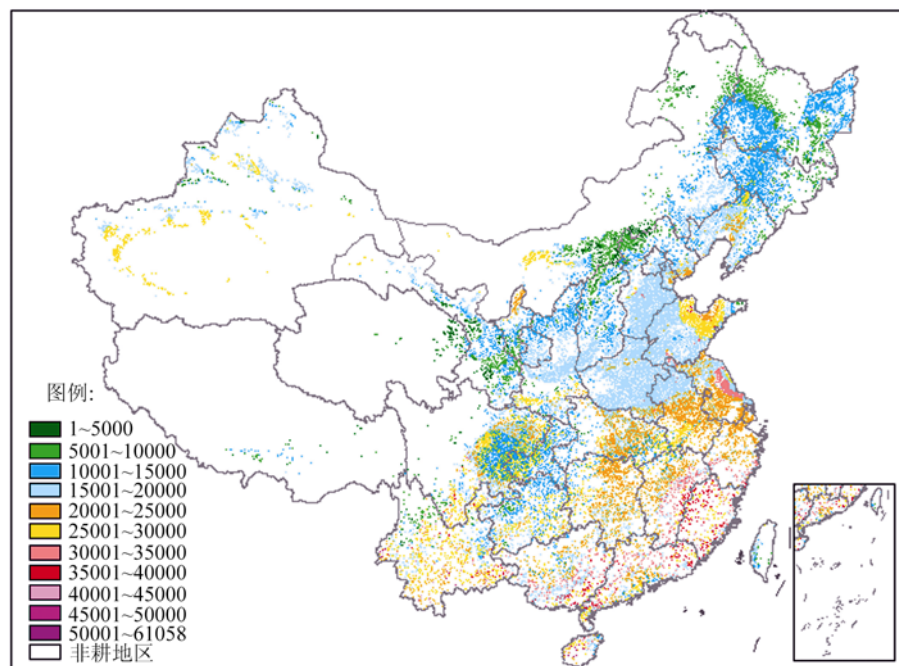


图 2 中国农田光温生产潜力空间分布图
90 年代气象参数, 80 年代末 LUCC, 单位: kg/hm²

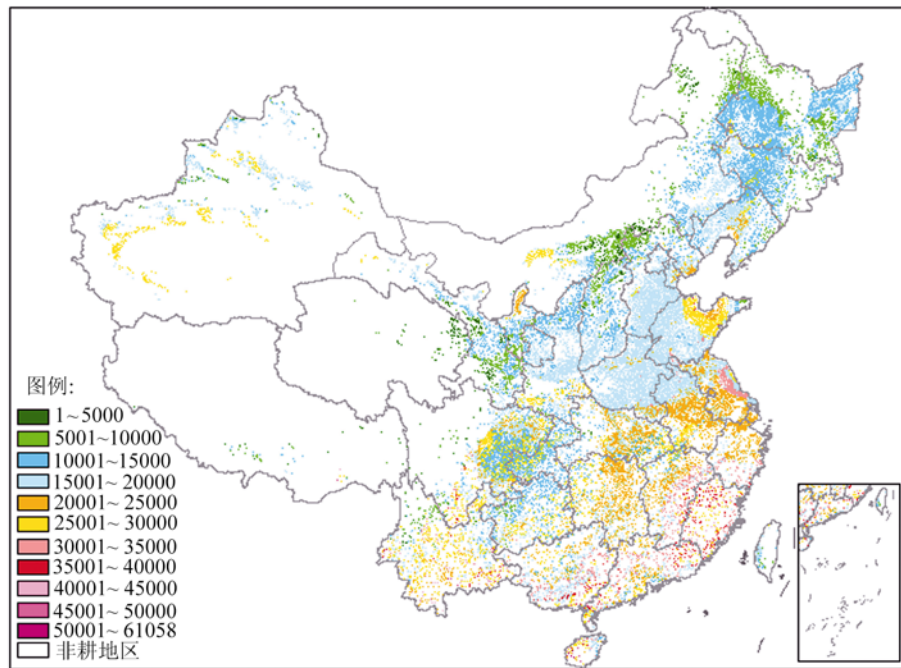


图 3 中国农田光温生产潜力空间分布图
90 年代气象参数, 90 年代末 LUCC, 单位: kg/hm^2

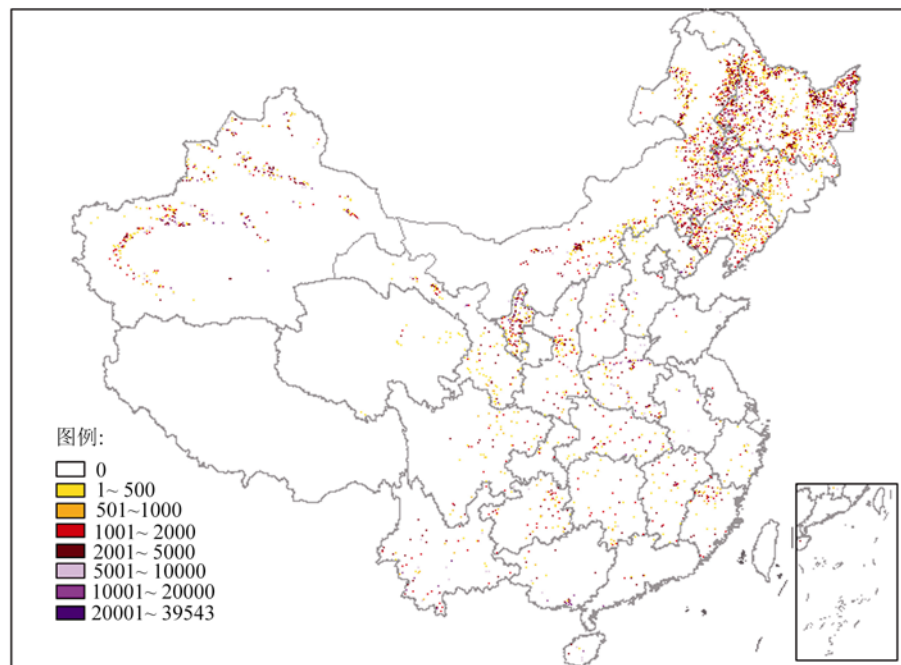


图 4 90 年代农田扩张所导致的中国农田光温生产潜力的净增长(单位: kg/hm^2)

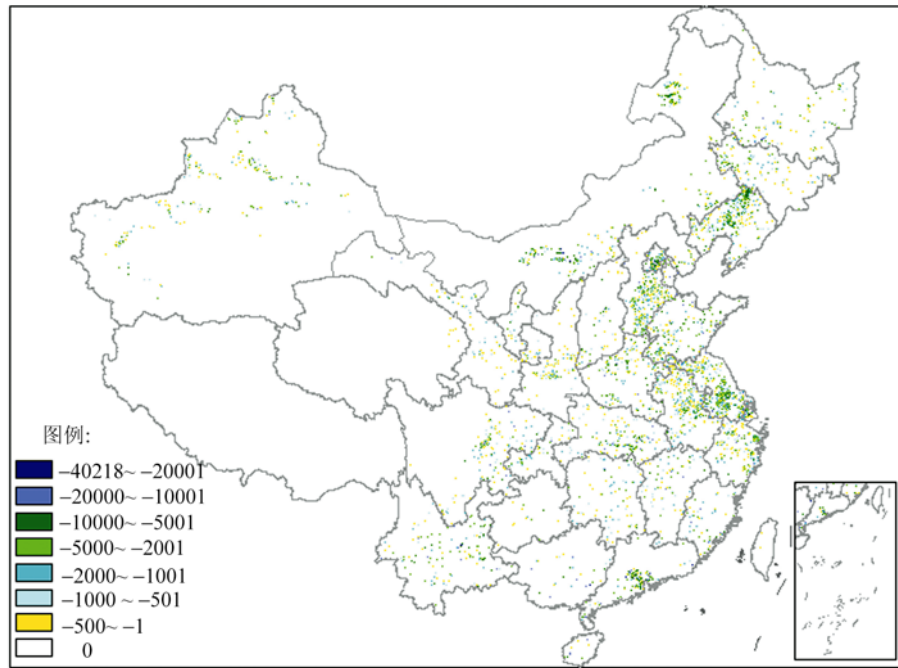


图 5 90 年代农田损失所导致的中国农田光温生产潜力的净减少(单位: kg/hm^2)

从上述计算结果来看, 20 世纪 90 年代受 LUCC 过程的影响中国农田光温生产潜力的变化在空间分布上表现出明显的区域差异性. 在各种土地利用类型相互转变与转化过程中, 耕地扩张和农田损失是造成中国农田光温生产潜力总量变化的主要原因. 20 世纪 80 年代末至 90 年代末的 10 年间, 耕地扩张和农田损失所导致的中国农田光温生产潜力总量变化和空间分布格局如表 1 所示. 从图 4 来看耕地扩张区主要分布于中温带和暖温带的湿润、半干旱和干旱地区. 农田光温生产潜力的增长是以开垦天然林、草资源, 破坏自然生态环境为代价的, 因此其负面效应不容忽视. 20 世纪 90 年代我国城乡建设用地净增加了 2639 万亩^[5], 其中 81% 来自于对耕地的占用. 城乡建设用地扩张是造成全国农田光温生产潜力总量减少

的主要原因, 城乡建设用地扩张所占用的耕地大多是东南沿海及内陆地势平坦、水热条件优越、集约化程度较高的优良耕地资源. 因此, 从全国来看, 农田光温生产潜力变化的总体趋势为南减北增, 增加与减少两者相抵, 仍有一定增长——全国总量净增加 2622 万吨, 但这种净增长是以损失优质传统耕地资源和毁坏自然生态环境为代价的.

3.2 90 年代中国各省区农田光温生产潜力总量变化特征

将基于 90 年代平均气象参数和 90 年代末 LUCC 数据估算的中国农田光温生产潜力空间分布图与中国省界图叠加, 并在此基础上统计各省农田光温生产潜力总量(TPTP, 即 Total Photosynthetic Thermal

表 1 90 年代 LUCC 过程所导致的中国农田光温生产潜力总量变化及空间分布格局^{a)}

变化类型	主要原因	变化总量/万吨	变化比例/%	空间分布
增加	耕地扩张(毁林、毁草开垦)	+8335	3.50	主要分布于东北、西北和华北等农林、农牧交错区和沙漠绿洲区(如图 4)
减少	农田损失(城乡建设用地侵占耕地)	-5713	-2.40	主要分布于黄淮海平原、长江三角洲、珠江三角洲、陇中、东南沿海、四川盆地东南部以及乌鲁木齐—石河子一带(如图 5)

a) 全国农田光温生产潜力总量是根据 90 年代平均气候条件以及 80 年代末至 90 年代末土地利用动态变化数据计算的全国农田光温生产潜力总量

Productivity)并与 1990~2000 年各省各年度的实际粮食产量¹⁾(Production)进行比较(图 6), 图中实线表示估算的各省农田光温生产潜力总量与实际粮食产量的相关趋势线, 从两者的拟合情况来看, 各省光温生产潜力总量与实际粮食产量的相关系数为 0.89081 ($P<0.0001$), 标准差为 2241.28788, 两者相关性较好,

因此各省农田光温生产潜力总量的变化在很大程度上能反映实际粮食产量的变化趋势. 将中国农田光温生产潜力净变化空间分布图与中国各省界图叠加, 并在此基础上分别计算各省 20 世纪 90 年代 LUCC 过程所导致的旱地与水田光温生产潜力总量的净变化, 结果如表 2, 图 7 以及图 8 所示.

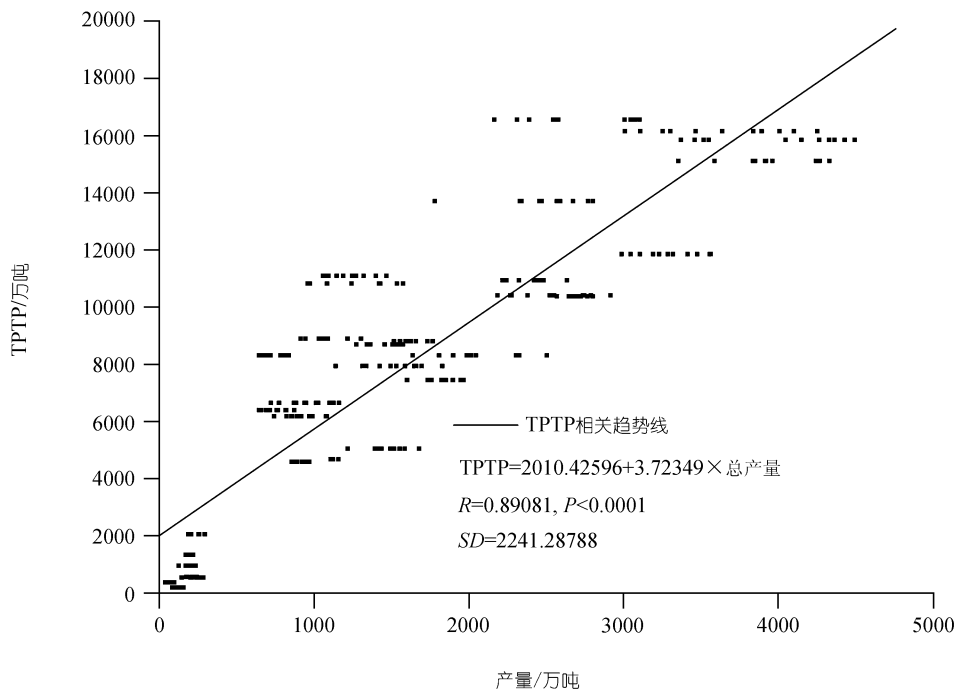


图 6 1990~2000 年中国各省区农田光温生产潜力总量与实际粮食产量的比较

表 2 90 年代中国各省区农田光温生产潜力总量净变化(90 年代平均气候参数, 单位: 万吨)

省区	水田	旱地	合计	省区	水田	旱地	合计	省区	水田	旱地	合计
黑龙江	1153	942	2095	陕西	3	22	25	浙江	-160	-62	-222
内蒙古	94	1091	1185	宁夏	164	192	356	江西	-26	-19	-45
新疆	41	700	741	山东	-9	-213	-222	湖南	-52	-23	-75
吉林	548	228	776	西藏	0	0	0	云南	-22	-57	-79
辽宁	-759	795	36	河南	24	2	26	贵州	-4	56	52
河北	13	-309	-296	江苏	-486	-79	-565	福建	-23	-8	-31
甘肃	0	77	77	安徽	-190	-51	-241	广西	-56	76	20
北京	-3	-157	-160	四川	-125	-8	-133	台湾	-2	0	-2
山西	0	1	1	湖北	-121	-26	-147	广东	-319	-71	-390
天津	-25	-21	-46	上海	-67	-1	-68	海南	0	-15	-15
青海	0	4	4	重庆	-18	-17	-35	全国	-427	3049	2622

1) 各省区各年度的粮食产量数据来源于中国自然资源数据库

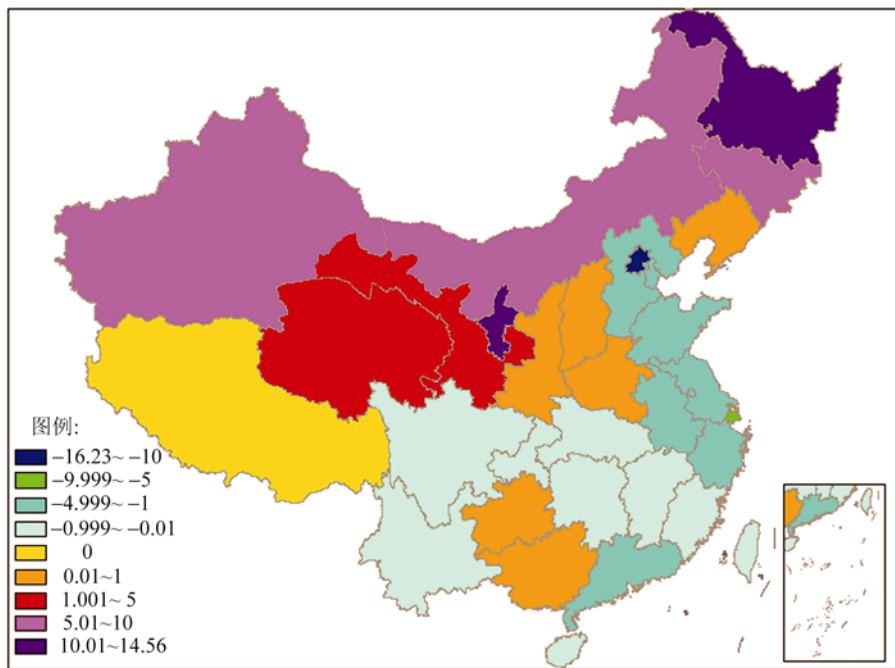


图 7 90 年代 LUCC 过程所导致的中国各省区农田光温生产潜力总量净变化率
90 年代平均气候参数, 单位: %

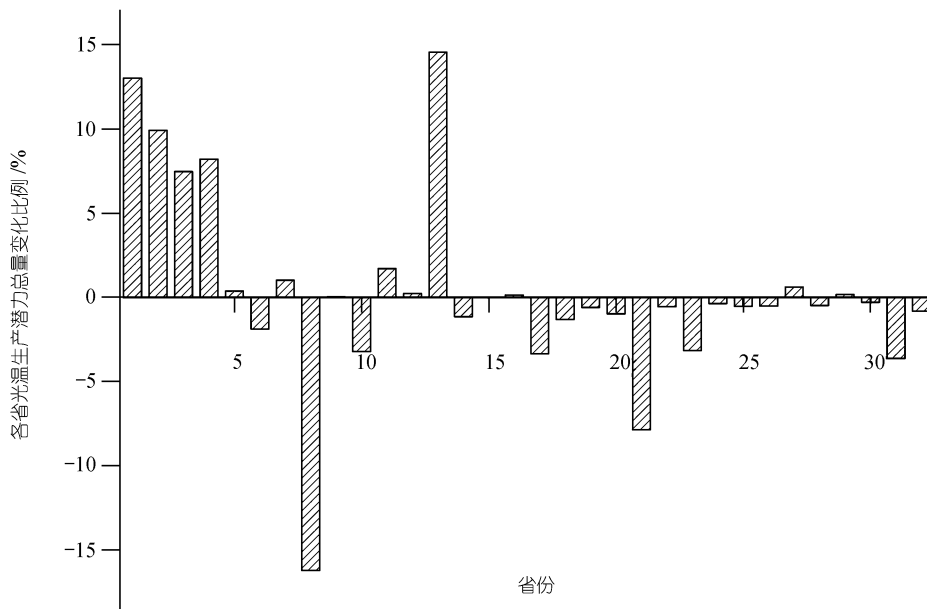


图 8 90 年代 LUCC 过程所导致的中国各省区农田光温生产潜力总量净变化率柱状图

90 年代平均气候参数, 单位: %。1 黑龙江, 2 内蒙古, 3 新疆, 4 吉林, 5 辽宁, 6 河北, 7 甘肃, 8 北京, 9 山西, 10 天津, 11 青海, 12 陕西, 13 宁夏, 14 山东, 15 西藏, 16 河南, 17 江苏, 18 安徽, 19 四川, 20 湖北, 21 上海, 22 重庆, 23 浙江, 24 江西, 25 湖南, 26 云南, 27 贵州, 28 福建, 29 广西, 30 台湾, 31 广东, 32 海南

从各省区农田光温生产潜力总量净变化率来看,我国北方的宁夏、黑龙江、内蒙古、吉林、新疆,农田光温生产潜力总量增长最明显,其中宁夏农田光温生产潜力总量净增加356万吨,增长率14.56%,居各省首位,其次为黑龙江省,净增长2095万吨,增长率为13.01%。这种增长主要是由于旱地和水田光温生产潜力总量的普遍增长所导致;宁夏旱地光温生产潜力总量净增加192万吨,占总光温生产潜力总量增加的54%,黑龙江省水田光温生产潜力总量净增加1153万吨,占总光温生产潜力总量增加的55%,而内蒙古旱地光温生产潜力总量净增加1091万吨,占总光温生产潜力总量增加的92%;这主要是由于受经济利益驱动以及局部增温的影响,一些低海拔地区的天然林、草地和荒地大量开垦为耕地的缘故。而北京、上海、天津、江苏、重庆、广东等省区农田光温生产潜力总量减少明显,其中北京减少16.23%,变化比率居首位。从空间分布来看,农田光温生产潜力总量减少比较明显的省区主要分布于我国东部及东南部沿海地区,这些省区经济发展较快,90年代城市扩张明显,建设用地侵占大量耕地,再加上近几年退耕还林的效果,耕地面积减少,从而使该地区农田光温生产潜力呈明显下降趋势。在全国范围内统计LUCC过程所导致的农田光温生产潜力总量变化,其中水田光温生产潜力总量减少427万吨,旱地光温生产潜力总量增加3049万吨(如表1),因此20世纪90年代LUCC过程对中国农田光温生产潜力的影响仍然以促进增长为主,从80年代末至90年代末10年间LUCC过程使中国农田光温生产潜力总量净增加了2622万吨。

4 结论与讨论

(1) 20世纪90年代LUCC过程直接导致中国农田光温生产潜力总量和区域分布的变化,总体趋势是南减北增,水田光温生产潜力总量减少427万吨,旱地光温生产潜力总量增加3049万吨,全国农田光温生产潜力总量净增加2622万吨。

(2) 在各种LUCC过程的作用下,20世纪90年代的耕地扩张和农田损失是导致全国农田光温生产潜

力总量净变化的主要原因,耕地扩张使全国农田光温生产潜力总量净增加8335万吨,占全国农田光温生产潜力总量的3.50%,主要分布在东北、西北和华北等农林、农牧交错区和沙漠绿洲区,主要是由于该地区大面积的农田开垦所导致;而农田损失使全国农田光温生产潜力总量净减少5713万吨,占全国农田光温生产潜力总量的2.40%,主要分布在黄淮海平原、长江三角洲、珠江三角洲、陇中、东南沿海、四川盆地东南部以及乌鲁木齐—石河子一带,其原因主要是该区域经济发展较快,城市扩张明显,城乡建设用地侵占大量耕地的缘故。

(3) 20世纪90年代LUCC过程虽然导致了全国农田光温生产潜力总量的净增长,但这种增长是以损失优良耕地资源,破坏天然林草资源为代价,对耕地资源的可持续利用构成威胁,其所造成的环境效应亦不容忽视。

参 考 文 献

- 1 Turner B L II, Skole D, Sanderson S, et al. Land-use and Land-cover Change. Science/Research Plan. HDP Report 7/IGBP Report 35, Stockholm and Geneva, 1995
- 2 陈奇伯, 王克勤, 齐实, 等. 黄土丘陵区宁夏西吉县土地利用动态与坡耕地生产力变化. 水土保持学报, 2002, 16(3): 28~78
- 3 Diana W. Estimating the loss of agricultural productivity in the Amazon. Ecological Economics, 1999, 31: 63~76 [DOI](#)
- 4 刘纪远, 刘明亮, 庄大方, 等. 中国近期土地利用变化的空间格局分析. 中国科学, D辑, 2002, 32(12): 1031~1040
- 5 刘纪远, 张增祥, 庄大方. 20世纪90年代中国土地利用变化时空特征及其成因分析. 地理研究, 2003, 22: 1~12
- 6 Mitas L, Mitasova H. General variational approach to the interpolation problem. Comput Math Applic, 1988, 16(12): 983~992 [DOI](#)
- 7 刘纪远, 布和敖斯尔. 中国土地利用变化现代过程时空特征的研究——基于卫星遥感数据. 第四纪研究, 2000, 20(3): 229~239
- 8 刘纪远主编. 中国资源环境遥感宏观调查与动态研究. 北京: 中国科学技术出版社, 1996
- 9 庄大方, 刘纪远, 刘明亮. Research activities on land use/land cover change in the past ten years in China using space technology. 中国地理科学(英文版), 1999, 9(4): 330~334
- 10 刘明亮, 唐先明, 刘纪远, 等. 基于1 km网格的空间数据尺度效应研究. 遥感学报, 2001, 5(3): 183~189
- 11 张稳, 庄大方, 胡文岩. 国家基本资源与环境遥感数据库集

- 成中的面积汇总技术. 遥感学报, 2000, 21(4): 304~310
- 12 Van Ittersum M K, Leffelaar P A, van Keulen H, et al. On approaches and applications of the Wageningen crop models. *Europ J Agronomy*, 2003, 18: 201~234 [\[DOI\]](#)
- 13 Jones P G, Thornton P K. The potential impacts of climate change on maize production in Africa and Latin America in 2055. *Global Environmental Change*, 2003, 13: 51~59 [\[DOI\]](#)
- 14 Yun J I. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural Systems*, 2003, 77: 23~38 [\[DOI\]](#)
- 15 Priya S, Shibasaki R. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modeling*, 2001, 135: 113~129 [\[DOI\]](#)
- 16 William E E, Albert W, Cynthia J H, et al. Spatial scales of climate information for simulating wheat and maize productivity: The case of the US Great Plains. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90: 51~63 [\[DOI\]](#)
- 17 Basso B, Ritchie J T, Pierce F J, Braga R P, et al. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural Systems*, 2001, 68: 97~112 [\[DOI\]](#)
- 18 Batchelor W D, Basso B, Paz J O. Examples of strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *Europ J Agronomy*, 2002, 18: 141~158 [\[DOI\]](#)
- 19 黄秉维. 中国农业生产潜力—光合生产潜力. 地理集刊(第 17 号), 1985: 15~22
- 20 Cutforth H W, Shay Kewich C F. A temperature response function for corn development. *Agric For Meteorol*, 1990, 50: 159~171 [\[DOI\]](#)
- 21 于沪宁, 赵丰收. 光热资源和农作物的光热生产潜力. 气象学报, 1982, (3): 327~334.
- 22 侯光良, 刘允芬. 我国气候生产潜力及其分区. 自然资源学报, 1990, 5(1): 60~65
- 23 张 强, 杨贤为, 黄朝迎. 近 30 年气候变化对黄土高原地区玉米生产潜力的影响. 中国农业气象, 1995, 16(6): 19~23
- 24 谢 云, 王晓岚, 林 燕. 近 40 年中国东部地区夏秋粮作物农业气候生产潜力时空变化. 资源科学, 2003, 5(2): 7~13
- 25 李忠武, 蔡强国, 唐政洪, 等. 作物生产力模型及其应用研究. 应用生态学报, 2002, 13(9): 1174~1178
- 26 徐春达, 高晓飞. 作物生产潜力模型在中国的应用. 干旱区资源与环境, 2003, 17(6): 108~112
- 27 黄明斌, 李玉山. 黄土塬区旱作冬小麦增产潜力研究. 自然资源学报, 2000, 15(2): 143~148
- 28 郭建平, 高素华, 潘亚茹, 等. 东北地区农业气候生产潜力及其开发利用对策. 气象, 1995, 21(2): 3~9
- 29 杨恒山, 王 芳, 张冬梅, 等. 哲里木盟 4 种主要农作物气候生产潜力及对比分析. 哲里木畜牧学院学报, 1999, 9(2): 19~24
- 30 李克焯. 河南作物生产潜力的估算和分析. 农业气象, 1981, (3): 6~11
- 31 马树庆. 气候变化对东北区粮食产量的影响及其适应性对策. 气象学报, 1996, 54(4): 484~492