

黄土高原地区冬、春小麦对气候变化的适应度评价

张立伟, 延军平, 李旭谱, 李敏敏

(陕西师范大学旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要:以整个黄土高原地区为研究区域,建立作物的气候变化适应度模型,通过数理统计和地理空间分析方法,分析了自 1960—2011 年来,区域冬、春小麦对水分、温度、光照的适应度时空变化特征,并进行了适应度分区。结果表明:区域冬小麦全生育期的综合适应度达到了较强适应水平,有减小趋势;除返青—拔节期在中度适应水平外,其他生育期均为较强适应水平。春小麦全生育期的综合适应度达到较强适应水平,有升高趋势;灌浆—成熟期最大,达到了较强适应水平;播种—出苗期最小,只达到中度适应水平。区域综合适应度由西北向东南呈增加趋势且与水分适应度分布的相关性最大,与温度适应度的相关性相对较小,与日照适应度的空间分布呈负相关;其倾向率在西部、西北和东北地区呈增加趋势;在南部和东南部呈减少趋势。冬小麦在返青—拔节期,春小麦在播种—出苗期需要加强人工管理,以增强其适应度;且气候变化对北部的春麦种植较为有利,而对南部的冬麦种植不利。

关键词:气候变化;适应度;小麦;空间分析;黄土高原

中图分类号: S512; S162.5 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)04-0214-10

Evaluation of adaptation degree of winter and spring wheat to climate change in Loess Plateau

ZHANG Li-wei, YAN Jun-ping, LI Xu-pu, LI Min-min

(College of Tourism and Environment Science, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: Taking Loess Plateau as the study area, the model of adaptation degree of crops to climate change was built. With mathematical statistics and geological spatial analysis methods, the spatio-temporal variation characteristics of adaptation degree of winter and spring wheat to precipitation, temperature and light from 1960 to 2011 was analyzed, and the regional division of adaptation degree was conducted. The results indicated that the synthesized adaptation degree of winter wheat during the whole growth period was mid-high (76.2%) and tended to decrease; the adaptation degree of winter wheat was moderate during revival to jointing stage but mid-high in other stages. The synthesized adaptation degree of spring wheat during the whole growth period was mid-high (70.9%) and tended to increase; the adaptation degree of spring wheat was mid-high during filling to maturing stage but moderate during sowing to emergence stage. The regional synthesized adaptation degree tended to increase from northwest to southeast in Loess Plateau; it was highly correlated to precipitation adaptation degree, moderately correlated to temperature adaptation degree, but negatively correlated to light adaptation degree. The trend rate of synthesized adaptation degree tended to increase in the west, northwest and northeast parts, but tended to decrease in the south and southeast parts of Loess Plateau. The climate change was somewhat beneficial to the planting of spring wheat in the north part, but became more and more harmful to the planting of winter wheat in the south part. It is essential to strengthen the management of winter wheat during revival to jointing stage and spring wheat during sowing to emergence stage so as to improve their adaptability.

Keywords: climate change; adaptation degree; wheat; spatial analysis; Loess Plateau

黄土高原地区具有丰富的耕地资源和光热条件,是我国重要的小麦种植区域,属暖温带大陆性季风气候。如今,全球气候变暖已是不争的事实,IPCC

至今为止的四次气候变化评估报告及其他研究对人类社会面对气候变化影响时适应能力的评估结果,引起了国际社会的广泛关注^[1-4]。农业生产活动深

收稿日期: 2012-10-05

基金项目: 国家自然科学基金项目“部分重大自然灾害的时空对称性: 结构、机理与适应对策”(41171090)

作者简介: 张立伟(1985—),男,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事全球变化与自然灾害研究。E-mail: z-lw@foxmail.com。

通讯作者: 延军平(1956—),男,陕西绥德人,教授,博士生导师,主要从事区域发展与自然灾害方向研究。E-mail: yanjp@snnu.edu.cn。

受气候变化的影响,特别是气候变化带来的极端气候事件对农业生产的不利影响巨大^[2,4]。研究黄土高原农作物在气候变化背景下的适应度时空变化特征,在农业种植结构和种植制度的优化和调整,适时地人工管理提高作物适应能力方面有着十分重要的价值和意义。适应度评价是全球变化与可持续发展的纽带,适应的格局演变研究是适应度评价的基础,可持续发展是适应度评价的核心目标。人类对自然景观的进一步改变以及人为驱动下的气候变化,从根本上改变了地球表面过程,温度、降水的变化以及极端气候事件发生频率的不断提升,致使人类生存系统面临越来越多的挑战,减缓和适应全球变化带来有利或不利影响,识别危险区域,评估环境变化的规模和类型,这对实现区域早期预警至关重要^[5]。农作物对气候变化的适应度是指农作物在一定的时空范围内相对其他时段或区域对气候变化各组成要素变化的适应程度。农作物对气候变化的适应度越大,说明作物针对气候变化的适应能力越强,其要达到可持续发展目标的调控程度越小,反之亦然^[6]。王新华^[7]在对秦岭南部的汉中地区的小麦适应度的研究表明,其冬小麦温度、降水、日照和气候适应度有时空差异性。在空间上,气候适应度的变化有着从平原向山地、由北部向南部、由东部向西部逐渐下降的趋势;而且区域总体在近 10 年以来上升趋势比较明显。陈太根^[8]在研究秦岭北部的咸阳地区时发现,区域整体及各子系统对气候变化的适应都处于低水平状态。苏坤慧^[9]对准河南北的河南地区

气候变化适应度变化特征研究的结果显示,小麦对气候变化的适应度在 1950—2006 年维持在 49% ~ 61% 的范围内。针对气候变化背景下的作物适应度、适宜度研究已有许多^[10-15],但其中系统地将整个黄土高原地区作为研究区域来研究其区域内种植的农作物在气候变化大背景下的适应度时空变化特征的文献更是鲜有。本文在系统分析黄土高原地区气候变化特征的基础上,通过适应度模型的建模分析,对黄土高原地区农作物适应度时空变化特征进行了详细分析,以期为区域作物种植制度与结构的优化提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

气象数据主要来自中国气象科学数据共享服务网提供的《中国地面气候资料旬值数据集》^[16],包括黄土高原地区(见图 1)的 58 个气象站点,1959 年 9 月—2011 年 7 月的逐旬平均气温、降水量、日照时数数据和《中国地面气候资料年值数据集》^[17]中的 1960—2010 年年平均气温、年极端最高气温、年极端最低气温、年降水量、年日照时数数据。个别的缺失值用插值法确定。DEM(数字高程模型)数据来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站提供的空间分辨率为 30 m 的数字高程数据产品^[18]。研究区界限范围及其行政区界线的矢量图层数据来自国家基础地理信息系统提供的 1:400 万国家基础地理信息数据。

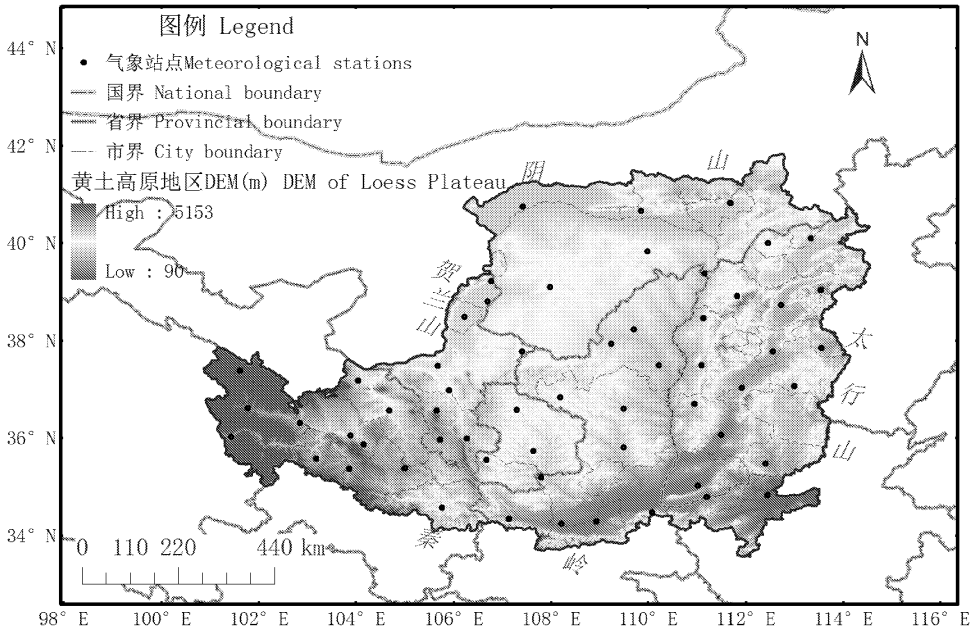


图 1 黄土高原地区气象站点及地理位置

Fig. 1 The geographic distribution of meteorological stations in Loess Plateau

1.2 研究方法

1.2.1 气候变化适应度模型的建立 1913 年,美国生态学家 Shelford VE 在最小因子法则基础上又提出了耐受性法则(Law of tolerance)的概念,他认为生物不仅受生态因子最低量的限制,而且也受生态因子最高量的限制。也就是说,生物对每一种生态因子都有其耐受的上限和下限,其耐受上限和下限之间就是生物对这种因子的耐受范围,其中包括最适合生存区域(如图 2)^[19]。所以,在作物生长的不同阶段各生态因子偏离最适应范围的程度为作物适应该种生态因子的适应度,多种生态因子的适应度的加权和为综合适应度。本文在假设影响作物生长的其他生态因子都能正常满足的情况下,研究作物在气候变化背景下的气候适应度。由于影响作物生长的主要气候因子是温度、水分和光照^[20-21],所以本文选用的影响作物生长的气候要素为旬平均温度、旬降水量和旬日照时数,分别建立其各自的适应度计算模型。

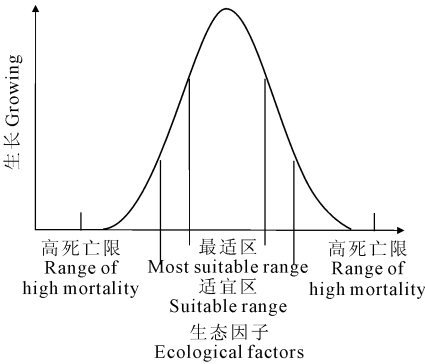


图 2 生物对生态因子的适应曲线

Fig.2 The adaptation curve of organisms to ecological factors

1.2.2 温度适应度评价方法

$$A_i = 100\% \times \begin{cases} 1 & T_{\min} < T_i < T_{\max} \\ T_i/T_{\min} & T_i < T_{\min} \\ T_{\max}/T_i & T_i > T_{\max} \\ 0 & T_i \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, A_i 为温度适应度; $T_{\min}$ 为实测的最低适应温度值(℃); $T_{\max}$ 为实测的最高适应温度值(℃); T_i 为第 i 个样本的温度值(℃); 当 $T_{\min} < T_i < T_{\max}$ 时,表示 T_i 在作物的适应温度之间,则温度适应度为 100%; 当 $T_i < T_{\min}$ 时,用 T_i 与 $T_{\min}$ 的比值度量其偏离最适温度区间的程度; 当 $T_i > T_{\max}$ 时用 $T_{\max}$ 与 T_i 的比值度量 T_i 偏离最适温度区间的程度; 当 $T_i \leq 0$ 时,由于作物开始发育的生物学零度多在 0℃ 之上,所以认为此时的 T_i 不适合作物的生长,故定义其适应度为 0%。

1.2.3 水分适应度评价方法

$$A_p = 100\% \times \begin{cases} P_i/P_c & P_i \leq P_c \\ 1 & P_i > P_c \end{cases} \quad (2)$$

式中, A_p 为作物水分适应度; P_i 为作物某生长期内的的大气降水量(mm); P_c 为作物某生长期内的正常耗水量(mm); 当 $P_i \leq P_c$ 时,用 P_i 与 P_c 的比值来度量实际降水量与作物需水量之间的偏离程度,即作物的水分适应度; 当 $P_i > P_c$ 时,实际降水量超过了需水量的要求,认为此时的作物适应度为 100%。

1.2.4 光照适应度评价方法

$$A_l = 100\% \times \begin{cases} L_i/L_t & L_i \leq L_t \\ 1 & L_i > L_t \end{cases} \quad (3)$$

式中, A_l 为光照适应度; L_i 为实际日照时数(h); L_t 为满足作物正常生长需要的理论日照时数; 当 $L_i \leq L_t$ 时,用 L_i 与 L_t 的比值测度实际光照量与作物正常生长所需的光照量的偏离程度,即作物的光照适应度; 当 $L_i > L_t$ 时,认为实际光照量完全满足了作物正常生长的需求,为 100% 满足。

1.2.5 综合适应度方法

综合(1)、(2)、(3) 式中各气候变化因子的适应度计算方法,定义其算数平均值为综合适应度,其值大小表示该作物在区域气候变化背景下的综合适应程度(公式(4))。

$$A_s = 1/3(A_l + A_p + A_t) \quad (4)$$

1.2.6 冬小麦评价因子标准 综合冬小麦的生长特性,将它的全生育期划分为 9 月下旬—11 月上旬的播种—分蘖期(WW1)、3 月中旬—4 月下旬的返青—拔节期(WW2)、5 月上旬—5 月下旬的抽穗—扬花期(WW3)、6 月上旬—7 月上旬的灌浆—成熟期(WW4)。各生育期间的正常耗水量标准,播种—分蘖期为 56 mm、返青—拔节期为 176 mm、抽穗—扬花期为 24 mm、灌浆—成熟期为 120 mm; 生育期间适应气温范围,播种—分蘖期为 12℃ ~ 16℃、返青—拔节期为 6℃ ~ 8℃、抽穗—扬花期为 16℃ ~ 22℃、灌浆—成熟期为 18℃ ~ 22℃^[11, 12-13, 20-25]。

综合研究区的地理位置特征,将冬小麦种植区的中心区域北纬 36°、东经 110°点的日照时数的 70% 值作为全区春小麦各生育期间的标准日照时数^[26-27],即播种—分蘖期为 405 h、返青—拔节期为 452 h、抽穗—扬花期为 308 h、灌浆—成熟期为 409 h。

1.2.7 春小麦评价因子标准 综合春小麦的生长特性,将其生育期划分为 3 月上旬—3 月下旬的播种—出苗期(SW1)、4 月上旬—4 月下旬的出苗—拔节期(SW2)、5 月上旬—5 月中旬的拔节—抽穗期(SW3)、5 月下旬—6 月上旬的抽穗—扬花期(SW4)、6 月中旬—7 月上旬的灌浆—成熟期(SW5)。各生

育期间的正常耗水量标准,播种—出苗期为 15 mm、出苗—拔节期为 50 mm、拔节—抽穗期为 50 mm、抽穗—扬花期为 60 mm、灌浆—成熟期为 40 mm;生育期间适应气温范围,播种—出苗期为 6℃~8℃、出苗—拔节期为 12℃~15℃、拔节—抽穗期为 12℃~17℃、抽穗—扬花期为 18℃~20℃、灌浆—成熟期为 18℃~22℃^[11,28-30]。

综合研究区的地理位置特征,将春小麦种植区的中心区域北纬 38.5°、东经 107°点的日照时数的 70% 值作为全区春小麦各生育期间的标准日照时数^[26-27],即播种—出苗期为 260 h、出苗—拔节期为 278 h、拔节—抽穗期为 198 h、抽穗—扬花期为 217 h、灌浆—成熟期为 312 h。

1.2.8 适应度评价的等级划分标准 基于以上各要素适应度计算公式的理论值及变化特征,可以将

表 1 适应度等级标准
Table 1 The grade standards of adaptation degree

等级标准 Grading standard	极不适应 Low adaptation	微弱适应 Mid-low adaptation	中度适应 Moderate adaptation	较强适应 Mid-high adaptation	强度适应 High adaptation
等级值 Grading value/%	0 ~ 10	11 ~ 30	31 ~ 70	71 ~ 90	91 ~ 100

1.2.9 其他分析方法 适应度的年际变化程度分析利用变异系数^[31](标准差除以均值乘以 100%)进行分析。适应度空间分析主要使用多元线性回归进行建模,然后在 Arcgis9.3 中进行栅格计算并利用克里格(Kriging)插值法进行空间差值分析^[32]。

2 结果与分析

2.1 适应度的年际变化

2.1.1 春小麦适应度年际变化

(1) 温度适应度

自 1960—2011 年以来,春小麦全生育期温度适应度值多年平均为 79.4%,达到较适应水平(图 3),以 0.010%/10a 的趋势增加;其拔节—抽穗、抽穗—扬花、灌浆—成熟期的温度适应度最大,达到了强度适应水平;出苗—拔节期较小,播种—出苗期最小,都只达到中度适应的水平。春小麦变化温度适应度变化最大的生育期为播种—出苗期和变化最小的为出苗—拔节期,变异系数分别为 49.6% 和 12.3%,在春小麦生长的这两个阶段要重视低温对作物的伤害(图表略)。

(2) 水分适应度

春小麦全生育期水分适应度值为 48.0%,仅达到了中度适应水平(图 3),变化趋势不明显;除灌浆—成熟期为较强适应水平外,其他生育期的水分适

适应度的等级划分为 5 个级别,见表 1。当适应度值在 0~10% 之间时,描述为极不适应等级,此时适应主体对气候变化带来的不利影响几乎无法适应,不能从中获益;当适应度值介于 11%~30% 时,适应主体适应气候变化产生的不利影响微弱,获益很少;当适应度值介于 31%~70% 时,适应主体对气候变化带来的不利影响适应中等,获益中等;当适应度值介于 71%~90% 时,适应主体对气候变化带来的不利影响适应程度大大提高,获益程度稳步提升,只是偶尔产生损失;当适应度值介于 91%~100% 之间时。适应主体完全有能力将气候变化带来的不利影响破解,始终能获益。该等级是根据具体的适应度计算模型而建立的值域内相对的等级标准,模型不同,划分范围可以不尽相同。

应度均近为中度适应水平;可见黄土高原地区的春小麦种植对水分的要求较高,目前还是不能很好地适应。春小麦不同生育期的水分适应度变化程度,除灌浆—成熟期相对较小外,其他生长阶段作物的水分适应度变化波动较大,说明作物缺水干旱的风险较大;不同生育期水分适应度的变异系数都呈增加趋势,可见黄土高原地区年降水量的变化对农业生产不利。

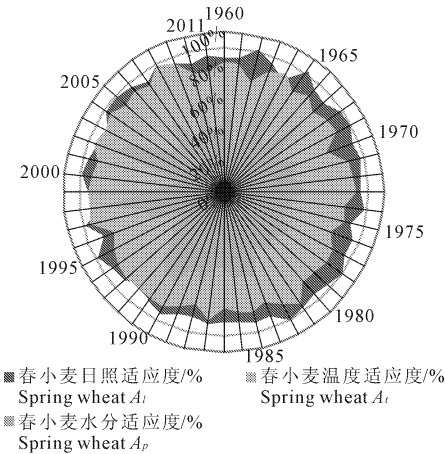


图 3 春小麦各要素适应度年际变化

Fig.3 The annual variation of adaptation degree of spring wheat to various factors

(3) 光照适应度

春小麦全生育期光照适应度值为 85.3%,达到

了较强适应水平(图 3),以 $-0.003\%/10a$ 的趋势降低;其各生育期均达到了较强适应水平;除出苗—拔节期为增加外,其余阶段均为降低趋势,可见光照的变化对农业生产不利。春小麦不同生育期的光照适应度变化程度最大的生育期为拔节—抽穗期,最小为出苗—拔节期,变异系数分别为 9.2% 和 7.1%;在不同时期 30 a 不同生育期变异系数除播种—出苗期和拔节—抽穗期为增加趋势外,其余 3 个时期略有减少。

(4) 综合适应度

春小麦全生育期综合适应度值为 70.9%,达到较强适应水平,以 $0.002\%/10a$ 的趋势增加。各春小麦生育期中,灌浆—成熟期的综合适应度最大,达到了较强适应水平;出苗—拔节期较小,播种—出苗期最小,都只达到中度适应的水平,特别是在播种—出苗期综合适应度的调控空间较大。春小麦不同生育期的综合适应度变化最大的是播种—出苗期,为 16.9%;最小的是灌浆—成熟期的 4.3%;在不同时期 30 a 不同生育期的变异系数都有升高的趋势,但是幅度不大(图 4)。

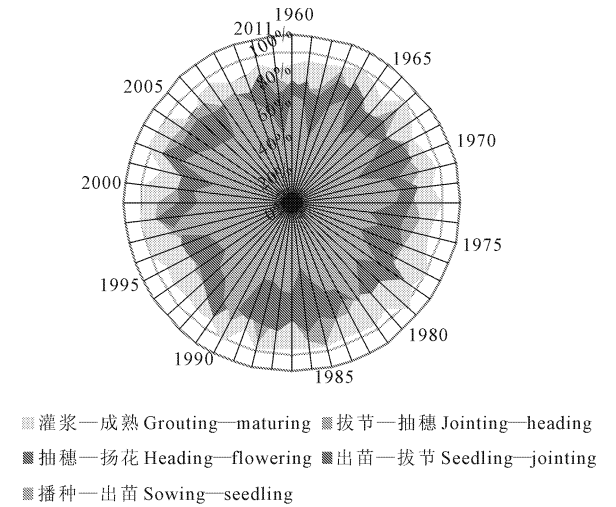


图 4 春小麦各生育期综合适应度年际变化
Fig.4 The annual variation of synthesized adaptation degree of spring wheat

2.2.2.2 冬小麦适应度年际变化

(1) 温度适应度

自 1960—2011 年来,冬小麦全生育期温度适应度值为 87.1%,达到了较强适应水平(图 5),温度适应度以 $-0.0002\%/10a$ 的趋势降低。冬小麦的抽穗—扬花、灌浆—成熟期的温度适应度最大,达到了强度适应水平;播种—分蘖和返青—拔节期较小,达到了较强适应水平,可见在返青—拔节期应该更注重低温对作物的伤害以增强其适应度。冬小麦温度适

应度变化较大的生育期为播种—分蘖期和返青—拔节期,变异系数分别为 6.0% 和 6.7%,可见在作物生长的这两个阶段要重视低温对作物的伤害;在不同时期 30 a 不同生育期变异系数都呈增加趋势,气温变化对农业生产不利。

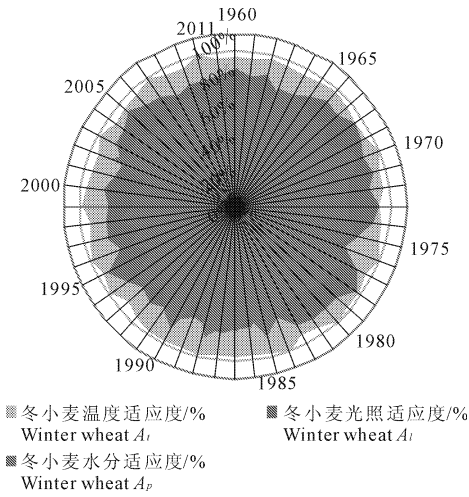


图 5 冬小麦各要素适应度年际变化
Fig.5 The annual variation of adaptation degree of winter wheat to various factors

(2) 水分适应度

冬小麦全生育期水分适应度值为 67.2%,达到了中度适应水平(图 5),趋势为 $-0.0106\%/10a$ 。各冬小麦生育期中,除返青—拔节期水分适应度在微弱适应水平外,其他生育期的水分适应度均达到了较强适应水平;可见在防范返青—拔节期的低温对作物的伤害以外还应该重视干旱对作物生长的不利影响。冬小麦全生育期水分适应度变化最大的生育期为返青—拔节期,最小的为抽穗—扬花期,分别为 39.1% 和 17.0%,可见在作物生长的返青—拔节期要特别重视干旱对冬小麦的伤害;在不同时期 30 a 不同生育期变异系数除返青—拔节期略有减少外其他阶段都呈增加趋势。

(3) 光照适应度

冬小麦全生育期光照适应度值为 76.2%,达到了中度适应水平(图 5),趋势为 $-0.0072\%/10a$ 。各冬小麦生育期的光照适应度均达到了较强适应水平;除返青—拔节期的光照适应度为增加外其余阶段均为降低趋势。冬小麦变化最大的生育期为播种—分蘖期,最小为灌浆—成熟期,变异系数分别为 39.1% 和 17.0%;不同生育期变异系数除播种—分蘖期和灌浆—成熟期为增加趋势外,其余时期略有减少。

(4) 综合适应度

冬小麦全生育期综合适应度值为 76.8%,达到了较强适应水平,趋势为 $-0.006\%/10a$ 。各冬小麦生育期中,除返青—拔节期综合适应度在中度适应水平外,其他生育期的综合适应度均达到了较强适应水平;可见在返青—拔节期气候变化对冬小麦的生长不利。黄土高原地区冬小麦各生育期中变化最大的为灌浆—成熟期的 5.8%,最小为播种—分蘖期的 4.8%;不同时期除灌浆—成熟期综合适应度略有升高外其他阶段都呈减小趋势(图 6)。

2.3 适应度的空间变化

2.3.1 适应度空间变化模型的建立 由于黄土高原地区的作物适应气候变化的适应度空间特征是由其所处空间位置影响的,所以将不同气候因子的适应度值与其所处的经度(λ)、纬度(φ)、海拔高度(h)三个空间位置信息进行多元线性回归分析,建立的回归模型均通过了 $\alpha = 0.01$ 时, $F = 4.167$ 的 F

检验,见表 2。

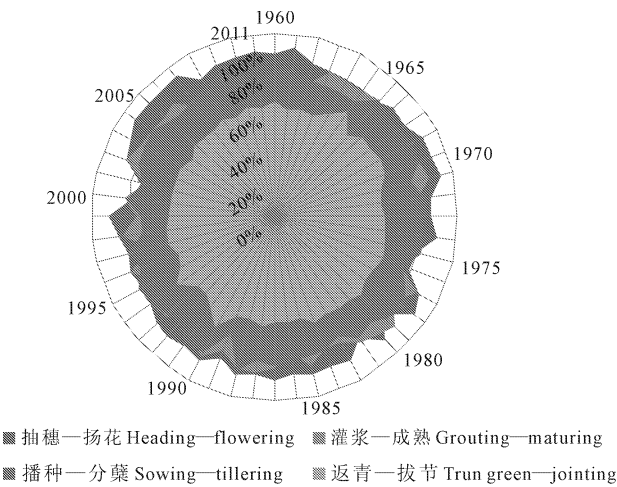


图 6 冬小麦各生育期综合适应度年际变化
Fig.6 The annual variation of synthesized adaptation degree of winter wheat

表 2 适应度多元回归模型

Table 2 The multiple regression model of adaptation degree

要素 Factor	模型 Model	F 值 F value
温度适应度 A_t Temperature adaptation degree	$A_t = -1.144\lambda - 0.77\varphi - 0.011h + 250.435$	25.021
水分适应度 A_p Precipitation adaptation degree	$A_p = 3.321\lambda - 7.584\varphi + 0.008h - 32.215$	71.507
光照适应度 A_l Light adaptation degree	$A_l = -0.529\lambda + 4.662\varphi - 0.001h - 33.607$	55.983
综合适应度 A_s Synthesized adaptation degree	$A_s = -0.549\lambda - 1.231\varphi - 0.001h + 61.538$	17.906

2.3.2 温度适应度空间变化特征 将表 2 中温度适应度的回归模型在 Arcgis9.3 软件的空间分析模块中进行栅格计算分析,得到 1960—2011 年黄土高原地区温度适应度空间变化,见图 7。分析发现,近 52 年,温度适应度值小于 70% 的中度适应等级的地区分布在黄土高原的东北部和最西部地区;而适应度等级大于 90% 的强度适应等级出现在汾渭平原、洛阳海拔较低的地区;其余面积广阔的区域为较强温度适应度的分布区域。通过在 Arcgis9.3 中分析温度适应度与年平均气温、年极端最高、最低温的相关性发现,温度适应度与年平均气温的空间分布相关性最大,为 $R(n = 661202, n \text{ 为栅格数,下同}) = 0.7047$;与年极端最高温度和年极端最低温度的相关性相对较小,为 $R(n = 661202) = 0.5706$ 和 $R(n = 661202) = 0.5737$ 。

通过分析图 8 可见,除黄土高原西部的景泰,西南部的临洮、天水、平凉、固原地区以及中部的横山、鄂托克旗和南部的华山,东北部的大部分地区为增加趋势外,其余地区的温度适应度均为减少趋势,特别是西北部的临河与西部的临夏、民和、门源地区减少趋势较强,为低值中心。相关性分析发现,温度适

应度倾向率与年平均气温倾向率的空间分布特征相关性最大,为 $R(n = 661202) = 0.4171$;与年极端最高温度倾向率的相关性相对较小,为 $R(n = 661202) = 0.3935$;与年极端最低温度倾向率的相关性最小,为 $R(n = 661202) = 0.1127$ 。

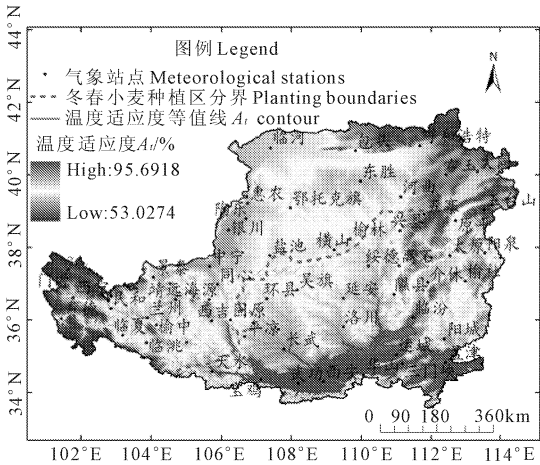


图 7 1960—2011 年黄土高原地区温度适应度空间变化
Fig.7 The spatial variation of temperature adaptation (A_t) in Loess Plateau from 1960 to 2011

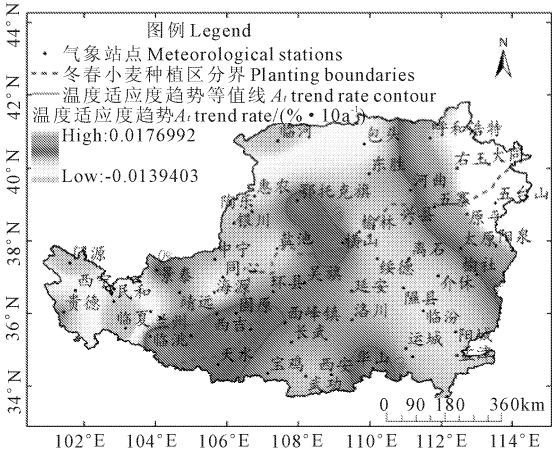


图 8 1960—2011 年黄土高原地区温度适应度倾向率的空间变化
Fig.8 The spatial variation of temperature adaptation (A_t) trend rate in Loess Plateau from 1960 to 2011

2.3.3 水分适应度空间变化特征分析 将表 2 中水分适应度模型在 Arcgis9.3 软件的空间分析模块中进行栅格计算分析,得到 1960—2011 年黄土高原地区水分适应度空间变化,见图 9。分析发现,水分适应度小于 30% 的微弱适应地区分布在西北部的临河春麦种植地区;大于 70% 的较强适应区域分布在东南部的冬麦种植地区;其余地区为中度适应地区,处在面积较大的中间区域;总体上冬麦区的水分适应度要大于春麦地区。其水分适应度的空间分布特征大体上由西北向东南方向递增;其与降水量的空间分布相关性较大,为 $R_{(n=661202)} = 0.8517$ 。

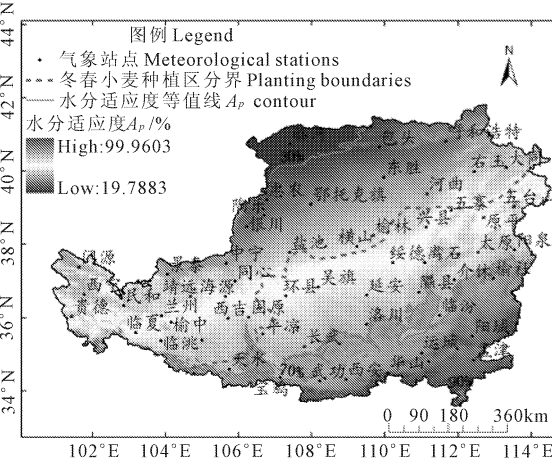


图 9 1960—2011 年黄土高原地区水分适应度空间变化
Fig.9 The spatial variation of precipitation adaptation (A_p) in Loess Plateau from 1960 to 2011

分析图 10 发现,黄土高原地区北部和西部的春麦种植区水分适应度呈增加趋势,增加中心在最西部的门源、西宁地区;而南部的冬麦种植区大多数地

区呈减少趋势,低值中心在最南部的武功、西安和华山地区;其与降水量倾向率分布的相关性较大,为 $R_{(n=661202)} = 0.7178$ 。

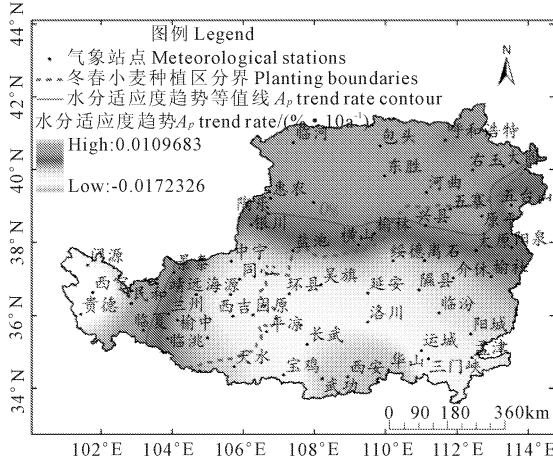


图 10 1960—2011 年黄土高原地区水分适应度倾向率的空间变化
Fig.10 The spatial variation of precipitation adaptation (A_p) trend rate in Loess Plateau from 1960 to 2011

2.3.4 光照适应度空间变化特征分析 将表 2 中光照适应度的回归模型在 Arcgis9.3 软件的空间分析模块中进行栅格计算分析,得到 1960—2011 年黄土高原地区光照适应度空间变化,见图 11。分析发现,光照适应度总体沿纬向由南向北逐渐递增的趋势;大于 90% 的强度适应等级分布在北部,小于 70% 的中度适应等级分布在最南部,其余地区为较强适应程度;北部的春小麦种植区的光照适应度大于南部的冬小麦种植区;其与日照时数的空间分布相关性较大,为 $R_{(n=661202)} = 0.8801$ 。

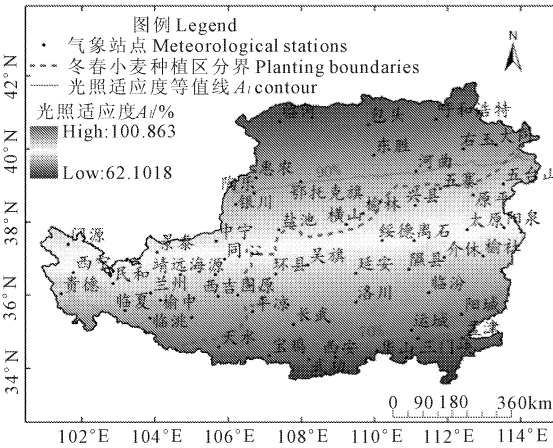


图 11 1960—2011 年黄土高原地区光照适应度空间变化
Fig.11 The spatial variation of light adaptation (A_l) in Loess Plateau from 1960 to 2011

分析图 12 可见,光照适应度的增加中心在环县、海源地区,减少中心在东部的太原地区;其与日照时数倾向率的空间分布相关性较大,为 $R_{(n=661202)} = 0.8628$ 。

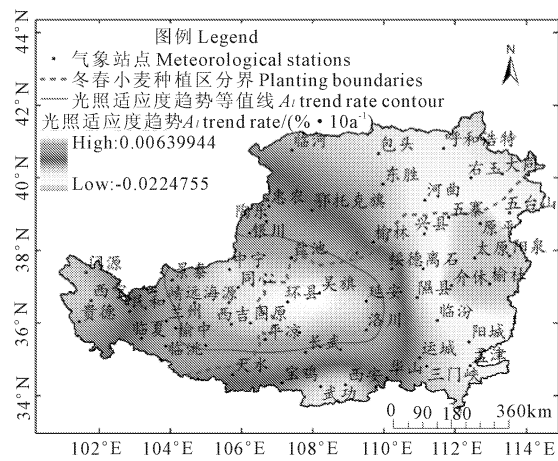


图 12 1960—2011 年黄土高原地区光照适应度倾向率的空间变化

Fig.12 The spatial variation of light adaptation (A_L) trend rate in Loess Plateau from 1960 to 2011

2.3.5 综合适应度空间变化特征分析 将表 2 中综合适应度的回归模型在 Arcgis9.3 软件的空间分析模块中进行栅格计算分析,得到 1960—2011 年黄土高原地区综合适应度空间变化,见图 13。分析发现,其由西北向东南呈逐渐增加的趋势;小于 70% 的中度适应等级地区分布在最西北部的临河地区,其余地区为大于 70% 的较强适应程度区域。通过在 Arcgis9.3 中分析其与其他要素适应度空间分布特征的相关性发现,综合适应度的空间分布特征与水分适应度的相关性最大,为 $R_{(n=661202)} = 0.8742$,与温度适应度的空间分布相关性相对较小,为 $R_{(n=661202)} = 0.5705$;但与日照适应度的空间分布呈负相关,为 $R_{(n=661202)} = -0.7551$;可见适应度的各要素因子的空间分布不均匀。同一地区的水热配置对作物生长并不是同时适合的。

通过对综合适应度 1960—2011 年的趋势变化进行空间分析发现(如图 14),综合适应度在黄土高原的西部、西北和东北地区呈增加趋势,高值中心在景泰、惠农和大同地区;在南部和东南部呈减少趋势,低值中心在南部的武功、西安和东南部的介休、三门峡地区。可见春麦种植区的综合适应度变化趋势有利于作物种植,而南部的冬麦种植区域变的不利于作物种植。相关性分析发现,综合适应度变化趋势与水分适应度倾向率的空间分布相关性较大,为 $R_{(n=661202)} = 0.5724$;与光照适应度倾向率的空间

分布相关性次之,为 $R_{(n=661202)} = 0.4705$;与光照适应度倾向率的空间分布特征相关性最小,为 $R_{(n=661202)} = -0.0592$ 。

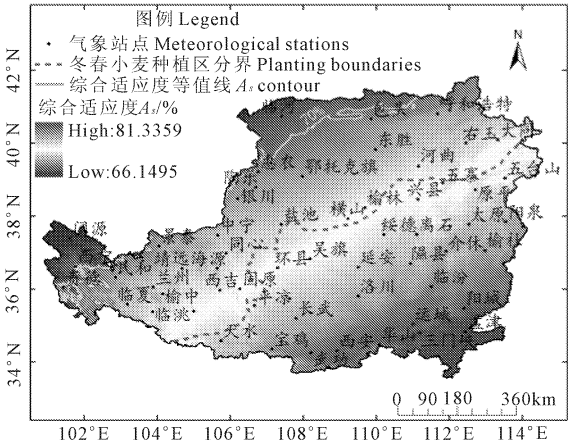


图 13 1960—2011 年黄土高原地区综合适应度空间变化
Fig.13 The spatial variation of synthesized adaptation (A_s) in Loess Plateau from 1960 to 2011

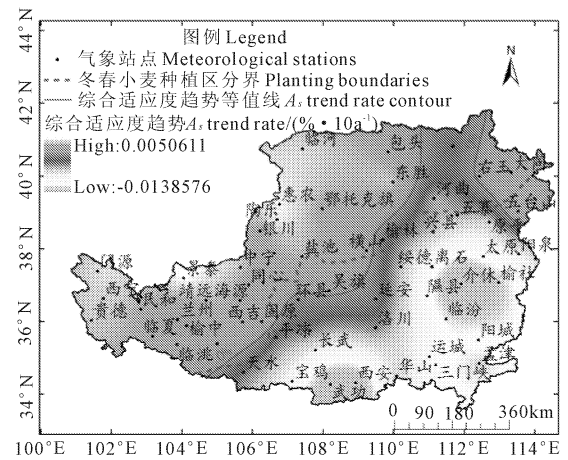


图 14 1960—2011 年黄土高原地区综合适应度倾向率的空间变化

Fig.14 The spatial variation of synthesized adaptation (A_s) trend rate in Loess Plateau from 1960 to 2011

3 结论与讨论

选用整个黄土高原地区作为研究区域,结合 Arcgis9.3 的地理空间分析功能,详细地分析了该地区 1960—2011 年间的气温、降水和日照三个主要气候要素的时空变化特征;并以小麦种植为例,针对其最适气候要素值,建模分析了其在气候变化背景下的适应度变化时空变化特征;通过 Arcgis9.3 的空间分析技术,实现了研究区农作物适应度评价结果的可视化,使得研究结果更易被相关领域结合利用;为相关研究提供了详实的理论与数据支撑。文章在分

析时是在假设全区作物生长所需的生态因子均能满足的条件下,只考虑温度、水分和光照三个主要气候因子的变化对作物适应能力的影响。文章侧重自然气候因子的变化,对有关的人文影响因素考虑甚少;选用的气象站点只有 58 个,在站点数量和模型的所使用的分辨率方面有待于进一步增加和提高。通过将各种气候数据与区域 DEM 数据的集成研究,得出了在气候变化背景下黄土高原地区农作物的适应度空间变化评价专题图,详细说明了其区域分异特征。在以后的研究中可以针对不同研究作物,在分析其气候变化适应度变化特征的基础上,通过集成叠加区域土地利用、土壤、水文、区域规划等专题图的信息,进一步集成分析得到黄土高原地区各种作物的适应能力及最适种植分区图,从而为区域总体农业生产空间布局、结构优化等提供理论数据支持,最终为区域的农业可持续发展做出贡献。得出主要结论有:

1) 冬小麦全生育期温度适应度值为 87.1%,达到了较强适应水平,且以 $-0.0002\%/10a$ 的趋势降低。冬小麦的抽穗—扬花、灌浆—成熟期的温度适应度最大,播种—分蘖和返青—拔节期较小;春小麦全生育期温度适应度值为 79.4%,达到较强适应水平,以 $0.010\%/10a$ 的趋势增加;其拔节—抽穗、抽穗—扬花、灌浆—成熟期的温度适应度最大,播种—出苗期最小,都只达到中度适应的水平。温度适应度小于 70% 的地区在东北部和最西部地区;大于 90% 的强度适应等级在汾渭平原、洛阳海拔较低的地区;其余面积广阔的区域为较强温度适应度的分布区域。

2) 冬小麦全生育期水分适应度值为 67.2%,达到了中度适应水平,趋势为 $-0.0106\%/10a$ 。冬小麦除返青—拔节期水分适应度在微弱适应水平外,其他生育期均达到了较强适应水平;春小麦全生育期水分适应度值为 48.0%,仅为中度适应水平,且变化趋势不明显;除灌浆—成熟期为较强适应水平外,其他均为中度适应水平。水分适应度由西北向东南方向递增,小于 30% 的微弱适应地区分布在西北部的春麦种植地区;大于 70% 的较强适应地区分布在东南部的冬麦种植地区;其余地区为中度适应地区。

3) 冬小麦全生育期光照适应度值为 76.2%,达到了中度适应水平,趋势为 $-0.0072\%/10a$ 。各冬小麦生育期的光照适应度均达到了较强适应水平;除返青—拔节期为增加外其余阶段均为降低趋势。春小麦全生育期光照适应度值为 85.3%,达到了较

强适应水平,以 $-0.003\%/10a$ 的趋势降低;其各生育期均达到了较强适应水平;除出苗—拔节期为增加外其余阶段均为降低趋势。光照适应度总体沿纬向由南向北逐渐递增;大于 90% 的强度适应位于北部,小于 70% 的中度适应区分布在最南部,其余地区为较强适应水平。

4) 冬小麦全生育期综合适应度值为 76.8%,达到了较强适应水平,趋势为 $-0.006\% \cdot 10a^{-1}$ 。冬小麦除返青—拔节期综合适应度在中度适应水平外,其他生育期均为较强适应水平;春小麦全生育期综合适应度值为 70.9%,达到较强适应水平,以 $0.002\% \cdot 10a^{-1}$ 的趋势增加。春小麦灌浆—成熟期的综合适应度最大,达到了较强适应水平;播种—出苗期最小,只达到中度适应水平。综合适应度由西北向东南呈增加趋势;小于 70% 的中度适应等级地区分布在最西北部的临河地区,其余地区为大于 70% 的区域。其分布特征与水分适应度的相关性最大,与温度适应度的相关性相对较小,但与日照适应度的空间分布呈负相关;其倾向率在黄土高原的西部、西北和东北地区呈增加趋势;在南部和东南部呈减少趋势。可见春麦种植区的综合适应度变化趋势有利于作物种植,而南部的冬麦种植区域变的越来越不利于作物种植。

参考文献:

- [1] Sirku Juholaa, Lisa Westerhoff. Challenges of adaptation to climate change across multiple scales: a case study of network governance in two European countries[J]. Environmental science & policy, 2011, (14):239-247.
- [2] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Robbert Biesbroek G, Rob J Swart, Timothy R Carter, et al. Europe adapts to climate change: Comparing National Adaptation Strategies [J]. Global Environmental Change, 2010, (20):440-450.
- [4] IPCC, Core Writing Team, Pachauri, R. K and Reisinger, A. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- [5] 苏坤慧. 河南省小麦生产对气候变化响应及适应度评价[D]. 西安:陕西师范大学, 2011.
- [6] 张立伟, 延军平, 马 琪, 等. 陕西南部地区农业对气候变化的适应度研究——以棉花为例[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30 (2):162-168.
- [7] 王新华, 延军平, 杨谨菲, 等. 1950—2008 年汉中市气候变暖及其经济适应[J]. 地理科学进展, 2011, 30(5):557-562.
- [8] 陈太根, 董 婕, 延军平, 等. 区域气候变化适应度评价——以咸阳市为例[J]. 地理科学进展, 2011, 30(3):319-324.

[9] 苏坤慧,延军平,李建山.河南省境内以淮河为界的南北气候变化差异分析[J].中国农业气象,2010,31(3):333-337.

[10] 黄 镭.中国红黄壤地区作物生产的气候生态适应性研究[J].自然资源学报,1996,11(4):340-346.

[11] 邓振镭.高原干旱气候作物生态适应性研究[M].北京:气象出版社,2005.

[12] 金之庆,葛道阔,高亮之,等.我国东部样带适应全球气候变化的若干粮食生产对策的模拟研究[J].中国农业科学,1998,31(4):51-58.

[13] 孙 芳,杨 修,林而达,等.中国小麦对气候变化的敏感性和脆弱性研究[J].中国农业科学,2005,38(4):692-696.

[14] 赖纯佳,千怀遂,段海来,等.淮河流域小麦-水稻种植制度的气候适宜性[J].中国农业科学,2011,44(14):2868-2875.

[15] 段居琦,周广胜.中国双季稻种植区的气候适宜性研究[J].中国农业科学,2012,45(2):218-227.

[16] 中国气象局国家气象信息中心.中国地面气候资料年值数据集[EB/OL].[2011-11-13].http://old-cdc.cma.gov.cn/shuju/index3.jsp?tpcat=SURF&dsid=SURF_CLI_CHN_MUL_TEN.

[17] 中国气象局国家气象信息中心.中国地面气候资料年值数据集[EB/OL].[2011-11-13].http://cdc.cma.gov.cn/shuju/index3.jsp?tpcat=SURF&dsid=SURF_CLI_CHN_MUL_YER.

[18] 国际科学数据服务平台.30米分辨率数字高程数据产品[EB/OL].[2011-11-13].http://datamirror.csdb.cn/list_dem?type=gdem&opType=list.

[19] 尚玉昌.普通生态学[M].北京:北京大学出版社,2010.

[20] 段若溪,姜会飞.农业气象学[M].北京:气象出版社,2002.

[21] 史定珊,毛留喜.冬小麦生产气象保障概论[M].北京:气象出版社,1994.

[22] 周晋红,刘武华.冬小麦气候影响评价方法和模式研究[J].山西农业科学,2007,35(1):44-47.

[23] 卫志祥,黄莎莎,张会金,等.气候条件对小麦各生育期及产量的影响分析[J].安徽农业通报,2011,17(1):69-70.

[24] 曹卫星.小麦品质生理生态及调优技术[M].北京:中国农业出版社,2009.

[25] 中国农业科学院作物育种栽培研究所.冬小麦栽培研究[M].北京:中国科学技术出版社,1992.

[26] 陶祖文.关于日照针的感应性能和实际日照百分率的确定[J].气象学报,1964,34(2):248-252.

[27] 周锁铃,缪启龙,吴 息,等.日照百分率的小网格分析方法[J].气象科学,1993,13(2):201-210.

[28] 刘玉兰,张晓煜,刘 娟,等.气候变暖对宁夏引黄灌区春小麦生产的影响[J].气候变化研究进展,2008,4(3):90-94.

[29] 姚玉璧,王润元,杨金虎.黄土高原半干旱区气候变化对春小麦生长发育的影响——以甘肃定西为例[J].生态学报,2001,31(15):4225-4234.

[30] 雷水玲.全球气候变化对宁夏夏春小麦生长和产量的影响[J].中国农业气象,2001,22(2):33-36.

[31] 徐建华.现代地理学中的数学方法[M].北京:高等教育出版社,2002.

[32] 郭 伦,刘 瑜,张 晶,等.地理信息系统——原理、方法、和应用[M].北京:科学出版社,2001.

(上接第 213 页)

[12] 李 昊,蔡运龙,陈睿山,等.基于植被遥感的西南喀斯特退耕还林工程效果评价——以贵州省毕节地区为例[J].生态学报,2011,31(12):3255-3264.

[13] 陈 芳,魏怀东,丁 峰,等.基于 NDVI 的黄土丘陵沟壑区退耕还林还草监测及效果评价——以定西市安定区为例[J].西北林学院学报,2008,23(1):50-53.

[14] 黄文广,刘晓东,于 钊,等.禁牧对草地覆盖度的影响——以宁夏盐池县为例[J].草业科学,2011,28(8):1502-1506.

[15] 朱敬芳,邢白灵,居为民,等.内蒙古草原植被覆盖度遥感估算[J].植物生态学报,2011,35(6):615-622.

[16] 宋富强,邢开雄,刘 阳,等.基于 MODIS/NDVI 的陕北地区植被动态监测与评价[J].生态学报,2011,31(2):354-363.

[17] 王 朗,傅伯杰,吕一河,等.生态恢复背景下陕北地区植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2010,21(8):2109-2116.

[18] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995—2000[J]. Science in China (D), 2003,46(4):373-384.

[19] Li Z J, Chen X G, Li J P, et al. Vegetation coverage change and its relationship with temperature, precipitation and evaporation in Liupan-shan[J]. Meteorological and Environmental Research, 2010,1(4):21-26.

[20] 成军锋,贾宝全,赵秀海,等.干旱半干旱地区植被覆盖度的动态变化分析[J].干旱区资源与环境,2009,23(12):172-176.

[21] 吴 云,曾 源,吴炳方,等.基于 MODIS 数据的三北防护林工程区植被覆盖度提取与分析[J].生态学杂志,2009,28(9):1712-1718.

[22] 赵传成,王 雁,丁永建,等.西北地区近 50 年气温及降水的时空变化[J].高原气象,2011,30(2):385-390.

[23] 闫军辉,刘冬梅,延军平.陕甘宁地区气候变化空间结构[J].干旱区资源与环境,2009,23(9):67-71.

[24] 李登科,范建忠,王 娟.陕西省植被覆盖度变化特征及其成因[J].应用生态学报,2010,21(11):2896-2903.

[25] 李军媛,晏利斌,程志刚.陕西省植被时空演变特征及其对气候变化的响应[J].中国水土保持,2011(6):29-31.