

黄河源区近 40 年参考作物蒸散量变化特征研究

汪治桂^{1,2}, 王素萍¹, 王建兵², 高晓清³

(1. 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020; 2. 甘南州气象局, 甘肃 合作 747000; 3. 中国科学院寒旱区陆面过程与气候变化重点实验室, 中国科学院寒旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 选取位于黄河源区 10 个气象台站 1971—2010 年观测资料, 运用彭曼—蒙蒂斯公式计算出各站参考作物蒸散量(ET_0)。通过数学统计、相关分析、小波分析等方法对黄河源区 ET_0 分别作了空间分布、年内变化和年变化等特征分析, 结果发现源区 ET_0 空间分布不均匀, 呈现西北部大于东南部。年内 ET_0 逐月变化表现为典型的单峰型; 源区 ET_0 的四季分布差异较大, 夏季蒸散量最大, 冬季最小, 春、秋季次之。各季节 ET_0 与气温和日照呈显著正相关, 而与降水量和相对湿度呈明显负相关。 ET_0 年际变化为逐年波动式上升趋势, 整个源区年平均 ET_0 以 $6.1 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 的气候倾向率逐年增大。40 a 间 ET_0 曾出现过两次较为明显的准周期变化, 分别在 20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期, 约为准 8 a 周期, 1990 年以后基本表现为准 5 a 周期变化。

关键词: 参考作物蒸散量(ET_0); 空间分布; 年季变化; 年内变化; 黄河源区

中图分类号: S161.4 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2013)06-0169-05

Study on the variation characteristics of reference crop evapotranspiration in recent 40 years in source region of Yellow River

WANG Zhi-gui^{1,2}, WANG Su-ping¹, WANG Jian-bing², GAO Xiao-qing³

(1. Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Lanzhou, Gansu 730020, China; 2. Gannan Meteorological Bureau of Gansu Province, Hezuo, Gansu 747000, China; 3. Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Based on the measured data of 10 meteorological stations from 1971 to 2010 in source region of Yellow River, utilized the Penman – Monteith Formula to calculate the reference crop evapotranspiration(ET_0) for each station. Through several methods as mathematical statistic, correlation analysis and wavelet analysis to do the characteristic analysis by spatial distribution, variation within the year and annual change respectively, for the ET_0 values in source region of Yellow River, the results showed that: The ET_0 in source region of Yellow River were space uneven distributed, appeared the northwest region more than the southeast region. The monthly variation of showed a typical single peak, also the distribution of ET_0 in four seasons appeared big difference. The ET_0 in summer was maximum and minimum in winter, secondary in spring and autumn. The ET_0 in each season presented a positive correlation with th temperature and sunshine hours, but significant negative correlation with the precipitation and relative humidity. The annual ET_0 presented an increasing trend year by year, the yearly ET_0 was average increased $6.1 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ in whole source region. During the 40 years, the ET_0 has appeared two times significant cyclic change as in middle of seventy to metaphase of eighty, almost the cycle was 8 years, but after the 1990, it was basically expressed the changing cycle of 5 years.

Keywords: reference crop evapotranspiration(ET_0); spatial distribution; annual and seasonal change; variation within the year; source region of Yellow River

黄河源区地处青藏高原的东北部, 西望昆仑山, 具体地理位置位于 $95^{\circ}50'45''\text{E} \sim 103^{\circ}28'9''\text{E}$ 与 $32^{\circ}12'11''\text{N} \sim 35^{\circ}48'7''\text{N}$ 之间, 面积约 $1.22 \times 10^5 \text{ m}^2$, 总长度南界巴颜喀拉山, 北临布青山和鄂拉山, 东抵岷山,

约 1 552.4 km^[1]。曾有“地球第三极”之称的黄河源区是青藏高原的腹地,为黄河流域最高区域,源区内海拔高度均在 3 000 m 以上。黄河源区(下文统一简称源区)气候属于青藏高原亚寒带半湿润区,具有内陆高寒气候特征^[1-3]。近些年来,在全球气候变暖的大背景下,源区的局地气候也发生了很大变化,导致黄河源头多次发生断流现象。由于其特殊的地理位置及其环境,所以源区内的气候变化、生态现状及当地气候对生态环境的影响等长期以来为许多国内外学者、专家所关注^[3-7],刘猛^[8]等对源区早期的蒸散量变化及生态恶化的现象做了相关研究。在气候持续变暖、生态环境不断遭受人为和自然的破坏下,源区草地退化、沙化、甚至有些地方出现了水资源枯竭等现象。所以及时了解源区气候变化及可能蒸散量的变化状况,对于相关部门合理利用本地气候资源,保护黄河源区水资源及生态系统,提供具有重要科学价值的理论依据。

1 资料与方法

1.1 资料来源

文中选取 10 个气象台站,站点位于黄河源区内,分别隶属甘、青、川,地理位置介于 97°7'48"E ~ 102°58'12"E 和 33°48'00"N ~ 35°34'48"N 之间;所选站点资料序列为 40 a(1971—2010 年),观测资料在时间上统一、完整,且在源区气候中具有代表性^[1,9]。原始气象数据包括逐日平均气温、日最高气温、日最低气温、相对湿度、日照时数、平均风速等地面气象观测资料,蒸散量及气候资料序列按月、季、年时间尺度进行计算和统计。

1.2 研究方法

参考作物蒸散量(ET_0)是指假设平坦地面被特定矮秆绿色作物(高 0.12 m,地面反射率为 0.23)全部遮蔽,同时土壤保持充分湿润情况下的蒸散量,也称可能蒸散量或潜在蒸发量。参考作物蒸散量(文中多处简称 ET_0)计算方法较多^[10],本文采用联合国粮食及农业组织(FAO)推荐的气象上广泛应用的彭曼—蒙蒂斯(Penman—Monteith h)公式^[11],此公式较适合高寒地区^[12]。计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中, $G = 0.07(T_{i+1} - T_{i-1})$;

$$e^\circ(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27T}{T + 237.3}\right];$$

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{\max}) + e^\circ(T_{\min})}{2}; e_a = \frac{RH_{\text{mean}}}{100} e_s;$$

$$U_2 = U_{10} \frac{4.87}{\ln(67.8 \times 10 - 5.42)};$$

$$R_n = 0.77 \times (0.248 + 0.752 \frac{n}{N}) R_{s_0} -$$

$$\sigma \left[\frac{T_{\max, k}^4 + T_{\min, k}^4}{2} \right] (0.56 - 0.08 \sqrt{e_a}) (0.1 + 0.9n/N)^{[12]}$$

以上算式中, ET_0 为潜在蒸散量($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为参考作物表面净辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_{s_0} 为晴天辐射($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿表常数($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); e_s 为饱和水汽压(kPa); e_a 为实际水汽压(kPa); U_2 、 U_{10} 分别为 2 m 和 10 m 高处的平均风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); Δ 表示饱和水汽压($\text{kPa} \cdot \text{C}^{-1}$); $T_{\max, k}$ 、 $T_{\min, k}$ 分别为绝对温标的最高和最低气温(K), T_{i+1} 、 T_{i-1} 分别为第 $i+1$ 月和第 $i-1$ 月温度($^{\circ}\text{C}$); n 为实际日照时数(h), N 为最大日照时数(h), σ 为 Stefan-Boltzmann 常数; RH_{mean} 为月相对湿度(%)。

2 结果分析

2.1 源区参考作物蒸散量的空间分布

源区海拔高度差异明显,最大相对高度差值 3 617 m,虽然都属青藏高原气候,但局地小范围气候特点也有差异。为了能更好地反映源区内小气候差异的特点,准确统计 ET_0 的变化趋势,文中以源区地形差异划分为三个小区域,即北部区域(兴海作为代表站)、西部区域(清水河、玛多、达日)和东南部区域(河南、玛曲、久治、班玛、若尔盖、红原)。每个区域内各站点气候资料及 ET_0 的加权平均作为这个区域的平均值进行统计分析,能够表明源区海拔高度为西高东低地理特点。

从 ET_0 的空间分布来看,源区年平均蒸散量分布不均,东南部小于西北部。各站 40 a 的 ET_0 平均值显示:源区内蒸散量的最大值中心出现在兴海县,为 854.1 mm,最小值则出现在清水河一带,为 669.7 mm。北部明显大于东南部,而西部 ET_0 则最小。此特点恰好与站点区域平均海拔高度呈负相关。很明显源区从北到南,由东向西随着海拔高度的逐渐增高,蒸散量逐渐减小(图 1,表 1)。

2.2 源区参考作物蒸散量的年内变化特点与气象因子的相关分析

2.2.1 源区 ET_0 的年内变化特点 源区参考作物蒸散量的年内变化呈典型的单峰型(图 2),从 1 月

到 7 月平均以 $13.3 \text{ mm} \cdot \text{月}^{-1}$ 在逐月增大,于 7 月达到最大值后又开始以 $-16.7 \text{ mm} \cdot \text{月}^{-1}$ 减少,12 月降到全年最低值。显然后半年蒸散量的减少要比前半年的增大要快。另外从年内 ET_0 的季节变化特点来看,夏季蒸散量值最大,平均为 289.7 mm ,占年平均蒸散量的 38.3% ,其次春季到秋季依次减少,冬季则是源区蒸散量最小的季节,仅为 88.3 mm ,只占全年蒸散量的 11.7% ,约为全年的 $1/7$ 。总之,年内蒸散量的变化趋势与源区内季节降水量变化和气温的变化有相似特点:源区春季到夏季降水量缓慢增多并且气温逐渐升高,而参考作物蒸散量也呈增大趋势,从夏季到秋季至冬季,源区降水递减,气温逐步回落,蒸散量也呈明显减少趋势。

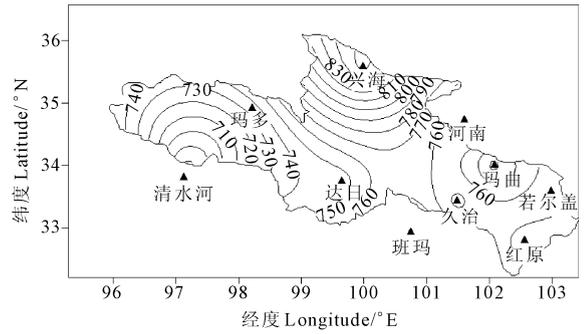


图 1 源区 40 a 平均年 ET_0 空间分布
Fig. 1 The spatial distribution of annual average ET_0 (mm) in source region of Yellow River

表 1 源区多年平均年 ET_0 分布与对应海拔高度对比

Table 1 Comparison of distribution of yearly average ET_0 with the altitude

站点 Station	北部 North		东南部 Southeast					西部 West		
	兴海 Xinghai	河南 Henan	玛曲 Maqu	若尔盖 Ruergai	红原 Hongyuan	班玛 Banma	久治 Jiuzhi	达日 Dari	玛多 Maduo	清水河 Qingshuihe
海拔高度/m Altitude	3324.3	3501.0	3471.4	3441.1	3492.7	3530.0	3630.0	3968.5	4273.3	4417.5
ET_0 /mm	854.1	739.7	784.1	753.3	746.4	794.6	745.6	744.6	734.9	669.7

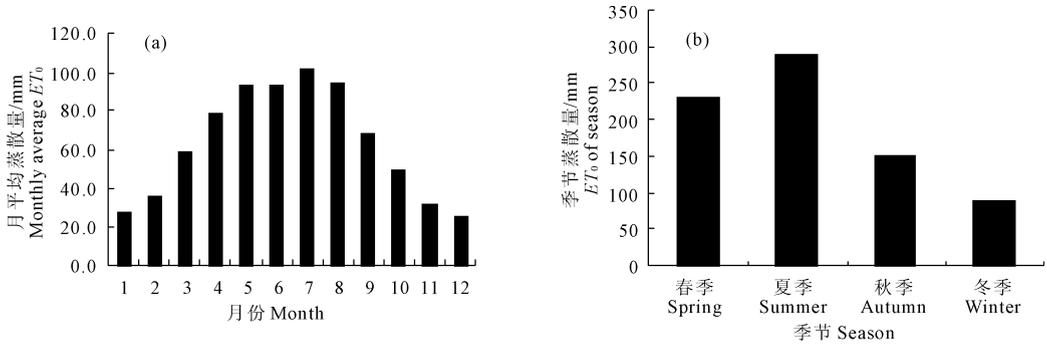


图 2 黄河源区 ET_0 年内变化特征(a 图为月变化,b 图为季节变化)

Fig. 2 Variation characteristics of ET_0 within the year in source region of Yellow River

2.2.2 气象因子与年内各季节 ET_0 的相关分析
为了进一步了解影响源区年内蒸散量变化特点的原因,对源区内季节蒸散量与同期基本气象因子进行了相关分析,发现源区参考作物蒸散量的季节变化与日平均气温、日照时数、降水量和相对湿度的相关性都比较好,而与风速没有明显的相关性,这与源区年内平均四季风速变化不明显有关系。源区各季节的蒸散量与相对应同期的气温、日照呈显著正相关,而与降水量、相对湿度呈负相关(表 2)。此结论与普宗朝^[13]、余冬平^[14]等作者的观点完全吻合。

表 2 年内各季 ET_0 与气象因子的相关系数

Table 2 Correlation coefficient of seasonal ET_0 with the meteorological factors

ET_0	气温 Temperature	日照 Sunshine	降水量 Precipitation	相对湿度 Relative humidity
春季 Spring	0.741 **	0.487 *	-0.279	-0.664 **
夏季 Summer	0.434 **	0.537 **	-0.397 *	-0.467 **
秋季 Autumn	0.456 **	0.511 **	-0.532 **	-0.230
冬季 Winter	0.302	0.231	-0.143	-0.200

注: ** 和 * 分别为通过 99% 和 95% 的可信度检验。下同。

Note: ** and * indicate 99% and 95% confidence test. The same as below.

2.3 源区参考作物蒸散量的年际变化及周期分析

2.3.1 参考作物蒸散量的年际变化 源区年均参

考作物蒸散量距平呈波动式上升趋势,且均以 $6.1 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ (通过 90% 的可信度检验) 的增大趋势逐年上升。这与源区近年来气温变化趋势相一致^[13]。从而在一定意义上也印证了气温对蒸散量影响的显著性^[15-16]。在全球气候变暖的大背景和整个青藏高原气温明显上升的基础上^[17-18],源区蒸散量有所增大是在所难免的。40 a 间正负距平相当,其中 20 世纪 70 年代初期年均蒸散量距平为正距平,并且从 1972 年到 1976 年蒸散量距平逐年下降,70 年

代后期又持续上升。80 年代初期源区蒸散量距平呈逐年下降趋势,从 1983 到 1986 年蒸散量距平出现跨越性突增和突减,80 年代中后期处于缓慢上升阶段,但在 1989 年蒸散量距平出现了 40 年间的最低谷 -8.1% 。从 90 年代初到 2005 年蒸散量距平持续呈波动式上升阶段,2005 年以后年蒸散量一直保持正距平,说明这阶段年蒸散量持续逐年增大,并于 2010 年达到正距平最高峰 7.8% 。显然源区蒸散量的年际变化具有周期性(图 3)。

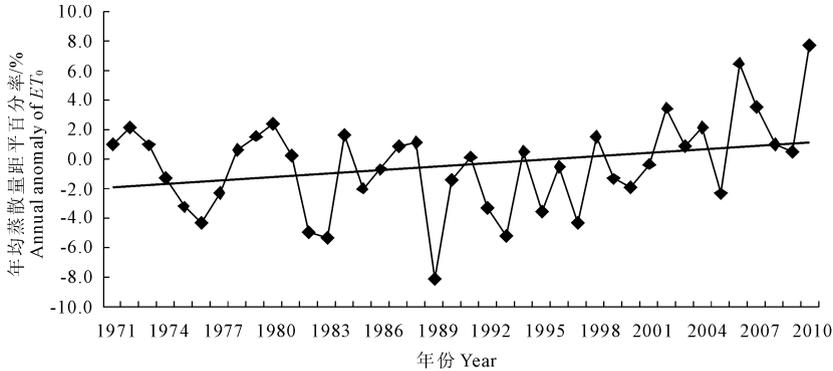


图 3 源区 ET_0 的年际变化特征

Fig.3 Variations of yearly ET_0 in source region of Yellow River

2.3.2 源区参考作物蒸散量年变化周期分析 为了进一步分析源区年参考作物蒸散量变化特征,运用小波分析发现 40 年中蒸散量的变化出现较明显的阶段性周期性,在 20 世纪 70 年代中期到 80 年代中期,约为准 8 a 周期。1998 年后基本为 5 a 准周期。其余时间没有显著的周期变化(图 4)。

各段附近的气候生态状况对湿地保护的影响倍受专家的关注^[19-21]。邱新法等作者对源区蒸发量也做过相关研究^[22]。由于高原地形复杂,气候异常多变,同样在黄河源区由于海拔高度的差异性和气候的特殊性,40 a 来各站的年蒸散量变化趋势也表现出明显的差异,从各站的年蒸散量变化的气候倾向率反映出:中西部的玛多上升最显著,增加趋势为 $16.2 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$;东南部的玛曲增加趋势为 $12.0 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。而北部的兴海则呈减少趋势,倾向率为 $-1.7 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$;40 a 来 ET_0 减少最明显的在东南部的班玛,倾向率为 $-7.7 \text{ mm} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。源区其它各站年蒸散量的变化趋势见表 3。

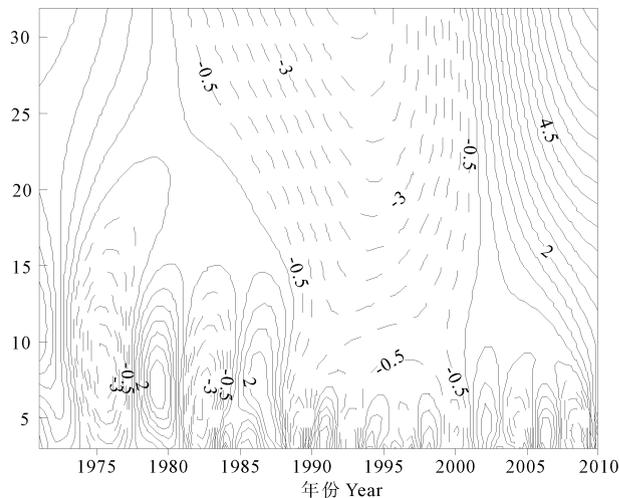


图 4 源区 ET_0 年变化的小波分析图

Fig.4 Wavelat analysis of yearly ET_0 in source region of Yellow River

3 影响源区参考作物蒸散量气候因子的相关分析

影响参考作物蒸散量的因子很多,究竟哪个气象要素对源区近 40 年来的 ET_0 变化起主要作用?通过对源区各站要素与本站 ET_0 的相关分析及对整个源区 ET_0 与源区气候因子的相关分析中发现:整个源区 ET_0 平均值与日照时数、风速、最高气温、最低气温呈正相关,与相对湿度则呈负相关,此结果与其它作者的分析结论一致^[23]。源区日照和日最高气温对 ET_0 的影响最显著,(均通过 0.01 的信度检验),而日最低气温、相对湿度、风速则对 ET_0 的

2.3.3 源区各代表站 ET_0 变化趋势 多年来黄河

表 3 源区各站 ET_0 变化的气候倾向率Table 3 The climate trend of ET_0 of each station in source region of Yellow River

站点 Station	气候倾向率 Linear trend /($\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	站点 Station	气候倾向率 Linear trend /($\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$)	站点 Station	气候倾向率 Linear trend /($\text{mm}\cdot 10\text{a}^{-1}$)
兴海 Xinghai	-1.7	达日 Dari	12.3**	玛曲 Maqu	12.0**
河南 Henan	-1.9	清水河 Qingshuihe	7.6*	若尔盖 Ruergai	8.6*
玛多 Maduo	16.2**	班玛 Banma	-7.7*	红源 Honyuan	5.9
久治 Jiuzhi	9.0*				

影响较弱(通过 0.05 的信度检验)。由于源区内地形、气候的差异,各站气候因子与本地 ET_0 的相关性和影响的主导因子也略有不同,比如源区海拔相对较高区的清水河、玛多、达日、久治各站与 ET_0 与风速则呈负相关,并且日照对 ET_0 的影响也不显著(风速和日照与 ET_0 的相关均没有通过信度检验),分析多年风速变化特点发现各站风速呈明显减小趋势,但日照多年变化不明显。源区其它区域及各站与气象因子的相关性与源区 ET_0 平均值与气象因子的相关性基本一致。总体来讲,日照时数、最高气温和相对湿度对源区年和四季参考作物蒸散量的相关最好,而最低气温和风速与 ET_0 的相关相对较弱。

通过分析源区各气象因子多年气候倾向率发现:多年来日照时数、风速、相对湿度分别以 $-10 \text{ h}\cdot 10\text{a}^{-1}$, $-0.1 \text{ m}\cdot \text{s}^{-1}\cdot 10\text{a}^{-1}$, $-0.5\% \cdot 10\text{a}^{-1}$ 呈减少趋势,而日最高和最低气温呈增加趋势,气候倾向率分别为 $0.4^\circ\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$, $0.3^\circ\text{C}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 。由此可见,多年来导致源区 ET_0 增加的主要气象因子可能是相对湿度的减小和日最高和日最低气温的升高。

4 小 结

1) 黄河源区年平均参考作物蒸散量在地理分布上呈现西北部大于东南部, ET_0 最大值中心位于兴海,而最小值则出现在清水河。

2) 黄河源区参考作物蒸散量年内逐月变化呈现典型的单峰型,蒸散量值逐月增大到 7 月后又开始逐月减少,至 12 月出现年内最小值。此变化特征与源区气温和降水量的年内变化特征基本一致。年内 ET_0 四季变化较明显,表现为夏季蒸散量最大,春、秋季次之,而冬季参考作物蒸散量只占全年蒸散量的 1/7。源区四季蒸散量与气温和日照呈正相关,与降水量和相对湿度呈负相关,而与各季平均风速无明显的相关性。

3) 40 a 来黄河源区参考作物蒸散量变化的总趋势为上升趋势,多年波动式变化过程中正负距平相当,1989 年 ET_0 出现负距平最低谷,2010 年 ET_0

上升到正距平最高峰。源区年参考作物蒸散量的变化分别约在 20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期和 90 年代末期后分别出现了准 8 a 与准 5 a 周期。

4) 黄河源区参考作物蒸散量与相对湿度和降水量呈负相关,而与日照、风速、日最高气温和日最低气温呈正相关。由于受青藏高原特殊地形和局地气候的影响,源区个别站气象因子与本站 ET_0 的相关也略有反常表现。但从对于整个源区 ET_0 的影响来看,相对湿度,日最高和日最低气温是影响源区参考作物蒸散量的主导因子。

参 考 文 献:

- [1] 徐宗学,和宛琳.近 40 年黄河源区气候要素分布特征及变化趋势分析[J].高原气象,2006,25(5):906-913.
- [2] 许叶新.黄河源区水文气象要素变化对生态环境的影响[J].水利发电,2003,29(9):13-16.
- [3] 樊 萍,王得祥,祁如英.黄河源区气候特征及其变化分析[J].青海大学学报(自然科学版),2004,22(1):19-24.
- [4] 柳媛普,吕世华,李锁银,等.近几十年黄河源区气候与植被变化及相关分析[J].高原气象,2007,26(5):1045-1050.
- [5] 谢昌卫,丁永建,刘时银.近 50 年来长江-黄河源区气候及水文环境变化趋势分析[J].生态环境,2004,13(4):520-523.
- [6] 曹文炳,万 力,曾亦键,等.气候变暖对黄河源区生态环境的影响[J].地学前缘,2006,13(1):40-47.
- [7] 王根绪,李 琪,程国栋,等.40a 来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应[J].冰川冻土,2001,23(4):346-352.
- [8] 刘 猛,夏自强,韩 帅,等.黄河源区蒸散量变化与生态恶化的关系[J].河海大学学报(自然科学版),2009,37(6):631-634.
- [9] 冯永忠,杨改河,杨世琦,等.江河源区地域界定研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2004,32(1):11-14.
- [10] 李玉霖,崔建垣,张铜会.参考作物蒸散量计算方法的比较研究[J].中国沙漠,2002,22(4):372-376.
- [11] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements FAO Irrigation & Drainage Paper 56·FAO, 1998·ISBN 92-5-104219-5.
- [12] 王素萍,宋连春,韩永翔.高寒区潜在蒸散量的计算方法探讨[J].干旱区研究,2009,1(2):126-130.
- [13] 普宗朝,张山清.近 48 年新疆夏半年参考作物蒸散量的时空变化[J].中国农业气象,2011,32(1):67-72.

- 季稻田 CO₂ 排放的影响[J]. 农业系统科学与综合研究, 2011, 27(3):295-300.
- [7] 苏荣瑞, 刘凯文, 耿一风, 等. 江汉平原稻-油连作系统冠层 CO₂ 通量变化特征[J]. 中国农业气象, 2012, 33(3):362-367.
- [8] 秦晓波, 李玉娥, 万扬帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6):210-216.
- [9] 夏文建, 周卫, 梁国庆, 等. 稻麦轮作农田氮素循环的 DNDC 模型分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(1):77-88.
- [10] 张晓艳, 张广斌, 纪洋, 等. 冬季淹水稻田 CH₄ 排放通量及其 $\delta^{13}\text{C}$ 的时间变化特征[J]. 土壤学报, 2012, 49(2):296-302.
- [11] Liu Yu-xue, Yang Min, Wu Yi-min, et al. Reducing CH₄ and CO₂ emissions from waterlogged paddy soil with biochar[J]. Journal of Soils and Sediments, 2011, 11:930-939.
- [12] Feng You-zhi, Xu Yan-ping, Yu Yong-chang, et al. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2012, 46:80-88.
- [13] 石生伟, 李玉娥, 秦晓波, 等. 晚稻期间秸秆还田对早稻田 CH₄ 和 N₂O 排放以及产量的影响[J]. 土壤通报, 2011, 42(2):336-341.
- [14] 郭森, 逆超普, 蔡祖聪, 等. 温室气体排放量空间尺度扩展方法的误差来源分析——以 CH₄MOD 模型为例[J]. 土壤学报, 2012, 49(5):916-923.
- [15] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 早稻秸秆原位焚烧对红壤晚稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及产量的影响[J]. 土壤, 2011, 43(2):184-189.
- [16] 孙国峰, 郑建初, 陈留根, 等. 猪粪沼液施用对稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应的影响[J]. 中国农业大学学报, 2012, 17(5):124-131.
- [17] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. 基于 DNDC 模型的川中丘陵区不同轮作制度下稻田 CO₂ 排放研究[J]. 中国农业气象, 2011, 32(4):530-537.
- [18] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. DNDC 模型对川中丘陵区稻田 CH₄、NO₂ 排放的模拟对比分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6/7):1003-1010.
- [19] Erle C E, Li Rong-gang, Yang Lin-zhang, et al. Long-term change in village scale ecosystems in China using landscape and statistical methods[J]. Ecol Appl, 2000, 10(4):1057-1073.
- [20] Erle C E. Long-term ecological changes in the densely populated rural landscapes of China[C]//Asner G P, DeFries R S, Houghton R A, eds. Ecosystem Interactions with Land Use Change[M]. Washington, DC: American Geophysical Union, 2004.
- [21] Ussiri D A N, Lal R, Jarecki M K. Nitrous oxide and methane emissions from long-term tillage under a continuous corn cropping system in Ohio[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 104(2):247-255.
- [22] 代光照, 李成芳, 曹凑贵, 等. 免耕施肥对稻田甲烷与氧化亚氮排放及其温室效应的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(9):2166-2172.
- [23] 李成芳, 曹凑贵, 汪金平, 等. 不同耕作方式下稻田土壤 CH₄ 和 CO₂ 的排放及碳收支估算[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2482-2488.
- [24] Harada H, Kobayashi H, Shindo H. Reduction in greenhouse gas emissions by no-tillage rice cultivation in Hachirogata polder, northern Japan: Life-cycle inventory analysis[J]. Soil Sci Plant Nutr, 2007, 53:668-677.
- [25] Lu Fei, Wang Xiao-ke, Han Bing, et al. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland[J]. Global Change Biology, 2009, 15(2):281-305.
- [26] Dong Wen-xu, Hu Chun-sheng, Chen Su-ying, et al. Tillage and residue management effects on soil carbon and CO₂ emission in a wheat-corn double-cropping system[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 83(1):27-37.
- [27] Jacobs A, Rauber R, Ludwig B. Impact of reduced tillage on carbon and nitrogen storage of two Haplic Luvisols after 40 years[J]. Soil & Tillage Research, 2009, 102:158-164, 240.
- [28] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5):1-5.
- [29] 徐华, 蔡祖聪, 八木一行. 水稻土 CH₄ 产生潜力及其影响因素[J]. 土壤学报, 2008, 45(1):98-104.
- [30] Wassmann R, Neue H U, Bueno C, et al. Methane production capacities of different rice soils derived from inherent and exogenous substrates[J]. Plant and Soil, 1998, 203:227-237.
- [31] Wang B, Xu Y, Wang Z, et al. Methane production potentials of twenty-eight rice soils in China[J]. Soil Fert Soils, 1999, 29:74-80.
- [32] 解淑艳, 王瑞斌, 郑皓皓. 2005—2011 年全国酸雨状况分析[J]. 环境监控与预警, 2012, 4(5):33-37.
- [33] 袁伟玲, 曹凑贵, 程建平, 等. 间歇灌溉模式下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放及温室效应评估[J]. 中国农业科学, 2008, 41(12):4294-4300.

(上接第 173 页)

- [14] 于东平, 张鑫, 何毅, 等. 青海省东部高原农业区参考作物蒸散量的时空变化[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2):66-71.
- [15] 刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 等. 长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(8):1486-1492.
- [16] 史忠海, 王国庆, 余辉, 等. 气温变化对黄河流域蒸发能力的影响[J]. 河南气象, 2006, (1):31-32.
- [17] 汪治桂, 王建兵, 冯景昌, 等. 甘肃玛曲县近 40a 潜在蒸散量的变化趋势[J]. 干旱气象, 2011, 29(4):488-491.
- [18] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势[J]. 地理学报, 2005, 60(1):6-9.
- [19] 蔡英, 李栋梁, 汤懋苍, 等. 青藏高原近 50 年来气温的年代际变化[J]. 高原气象, 2003, 22(5):464-470.
- [20] 崔英, 刘廷玺, 杜艳霞. 黄河内蒙古段蒸发皿蒸发量变化特征[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(4):252-261.
- [21] 李林, 张国胜, 汪青春, 等. 黄河上游流域蒸散量及其影响因素研究[J]. 地球科学进展, 2000, 15(3):256-259.
- [22] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 自然资源学报, 2003, 18(4):437-441.
- [23] 高歌, 陈德亮, 任国玉, 等. 1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J]. 地理研究, 2006, 25(3):378-386.