

## 宁夏澳洲青苹光温生产潜力的计算与分析

段晓凤<sup>1,2,3</sup>, 张磊<sup>1,2,3</sup>, 马国飞<sup>1,2,3</sup>, 卫建国<sup>1,2,4</sup>, 曹宁<sup>1,2,5</sup>

(1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室, 宁夏银川 750002; 2. 宁夏气象防灾减灾重点实验室, 宁夏银川 750002; 3. 宁夏气象科学研究所, 宁夏银川 750002; 4. 宁夏气象信息中心, 宁夏银川 750002; 5. 宁夏气象灾害防御技术中心(宁夏人工影响天气中心), 宁夏银川 750002)

**摘要:** 苹果 *Malus domestica* 生产潜力的主要影响因素为温度和光照。为计算宁夏高酸苹果光温生产潜力, 利用全区各地 1980-2015 年的气象资料及近 4 a 高酸苹果中晚熟品种 ‘澳洲青苹’ *Malus domestica* ‘Granny Smith’ 的发育期观测资料, 采用光照、温度逐级订正的方法, 分不同发育期(发芽期-幼果期和幼果期-成熟期)计算得出宁夏全区各地高酸苹果光合生产潜力及光温生产潜力。结果显示: 宁夏高酸苹果光合生产潜力为 114.0~146.9 t·hm<sup>-2</sup>, 与太阳光合有效辐射空间分布趋势一致; 光温生产潜力为 68.8~142.9 t·hm<sup>-2</sup>。与鲜食苹果对比, 高酸苹果光合生产潜力偏低 15.4%~18.4%, 而光温生产潜力比鲜食苹果高 10.9%~30.1%, 因此, 温度对鲜食苹果的限制作用大于对高酸苹果。另外, 高酸苹果生产潜力空间分布可分为灌区各地及中部干旱带东北部、中部干旱带其他地区至海原以北、海原以南 3 个地区, 基本与宁夏自然地理分区一致。表 5 参 18

**关键词:** 农业气象学; 果树学; ‘澳洲青苹’; 光合生产潜力; 光温生产潜力; 宁夏

**中图分类号:** S661.1; S162.5      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2095-0756(2017)03-0443-06

## Calculation and analysis of light and temperature potential productivity of *Malus domestica* ‘Granny Smith’

DUAN Xiaofeng<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Lei<sup>1,2,3</sup>, MA Guofei<sup>1,2,3</sup>, WEI Jianguo<sup>1,2,4</sup>, CAO Ning<sup>1,2,5</sup>

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic in Arid Regions, China Meteorological Administration, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Ningxia Key Laboratory for Meteorological Disaster Prevention and Reduction, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Ningxia Institute of Meteorological Sciences, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 4. Ningxia Meteorological Information Center, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 5. Ningxia Meteorological Disaster Prevention Technology Center (Ningxia Weather Modification Center), Yinchuan 750002, Ningxia, China)

**Abstract:** The main factors for productivity of highly acidic apples have shown to be temperature and illumination. To calculate light and temperature potential productivity of Ningxia highly acidic apples, making a contribution to increase actual yield, meteorological data (1980-2015) from the surrounding region and observational data of a late-maturing cultivar of nearly four-year-old ‘Granny Smith’ apples were used. Illumination and temperature were revised step by step. The productivity of highly acidic apples was accumulated at different developmental stages (germination period to young fruit period and young fruit period to mature fruit period) in the Ningxia region (AHP). Results showed that the photosynthetic potential production of highly acidic apples was 114.0-146.9 t·hm<sup>-2</sup>, which was consistent with the distribution of solar photosynthetically active radiation.

收稿日期: 2016-06-20; 修回日期: 2016-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31160249)

作者简介: 段晓凤, 高级工程师, 从事应用气象与农业生态研究。E-mail: dxl\_1127@163.com。通信作者: 张磊, 高级工程师, 从事应用气象与农业生态研究。E-mail: zhle.131@163.com

Light and temperature potential productivity was 68.8–142.9 t·hm<sup>-2</sup>. Compared with fresh apples, photosynthetic potential production of ‘Granny Smith’ apples was 15.4%–18.4% lower with light and temperature potential productivity being 10.9%–30.1% higher than fresh apples. Also, the restrictive action of temperature on fresh apples was greater than on the highly acidic apples. In addition, the spatial distribution of potential productivity for highly acidic apples was consistent with natural geographical subdivisions in Ningxia and was divided into three areas: 1) north areas of Ningxia, 2) central arid zones of Ningxia, and 3) south areas of Ningxia. [Ch, 5 tab. 18 ref.]

**Key words:** agricultural meteorology; pomology; *Malus domestica* ‘Granny Smith’; photosynthetic potential production; light and temperature potential productivity; Ningxia

随着国内外对果汁饮料需求量的增大, 国际市场对苹果 *Malus domestica* 榨汁的需求量也随之增大, 目前中国已形成了大小苹果汁加工厂 100 多家, 所产浓缩苹果汁 90% 以上用于出口, 出口量占世界的一半以上, 成为世界上最大的苹果汁生产与出口国。高酸苹果(high acid apple)果实硕大、丰产性强, 高糖、高酸, 生长旺盛, 抗逆性好, 产量远远高于常规品种, 给苹果栽植户带来了比较可观的效益。对高酸苹果生产潜力的研究可为其生产布局提供技术支撑, 进而对提高产量和经济效益具有重要意义。世界各国的有关学者从不同学科、不同角度, 对作物生产潜力进行了大量的研究。研究方法主要包括公式概算法和作物模型法<sup>[1-10]</sup>。目前, 欧美等国家已经开始普遍采用作物生长模型研究作物生产潜力, 中国也有一定的研究进展, 但主要是采用经验模型方法。归纳所采用的生产潜力模型可分为经验模型和物理模型, 物理模型由于考虑的因素众多, 土壤和生物资料难以获取, 模型的适用性研究和参数调整尚未大范围展开; 经验模型在中国应用较为广泛。苹果是多年生木本植物, 由于其生物学特性的特殊性, 生产力的影响因素比较复杂, 进而增加了估算其生产力的难度, 因此, 对苹果的生产潜力研究较少。20 世纪 90 年代初有研究<sup>[11]</sup>对苹果气候土壤生产潜力估算方法进行了研究, 系统分析了宁夏光、温、水、肥等环境因子, 提出了估算苹果气候土壤生产潜力的方法; 之后, 杨振伟<sup>[12]</sup>将昌黎地区的太阳辐射资源和苹果树生产潜力做了分析, 探索苹果的生产潜力与辐射因子之间的相互关系; 杨永岐等<sup>[13]</sup>从太阳辐射、降水量、霜期和越冬条件等诸多因素, 探讨了苹果产量形成的气候学基础。由于宁夏苹果种植区一般具备灌溉条件, 苹果生长一般不受水分的影响和限制, 因此, 笔者研究了高酸苹果光温生产潜力, 未考虑水分因子对其生产潜力的影响。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

宁夏全区各地 4–9 月光合有效辐射资料; 宁夏全区各地  $\geq 10$  °C 积温; 1981–2015 年实测最冷月最低气温资料。2012–2015 年高酸苹果中晚熟品种 ‘澳洲青苹’ *Malus domestica* ‘Granny Smith’ 发育期观测资料

### 1.2 方法

考虑了光、温等自然生态因子, 采用光照、温度逐级订正的方法。该方法建立在生理生态学研究的基础上, 依据苹果生产力形成的机理, 分不同发育期计算得出宁夏全区各地高酸苹果光合生产潜力及光温生产潜力。估算数学表达式:

$$y_i = y_Q \times K_i \quad (1)$$

式(1)中:  $y_i$  为苹果光温生产潜力;  $y_Q$  为光合生产潜力;  $K_i$  为温度订正系数。

1.2.1 光合生产潜力 果树光合生产潜力是在温度、水分、土壤、品种及其他农业技术条件处于最佳状态时, 其唯一能源是太阳辐射, 完全由光合有效辐射决定的生产潜力<sup>[14-15]</sup>, 是苹果收获太阳能可能形成的理想最高产量, 是产量的理论上线。有关高酸苹果光能利用率和热量条件评估方面的研究尚少, 本研究考虑了果园的群体结构, 树冠的反射、漏光率、生物学特性因素等对产量的影响, 按不同的生长阶段估算干物质产量, 再求其总和。其计算公式为:

$$y_Q = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N} Q_p (1-\alpha)(1-\beta)(1-\gamma)(1-\delta)(1-\rho)(1-\omega) Q D k_1 k_2 \quad (2)$$

式(2)中： $y_Q$  为单位面积光合生产潜力，单位  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ； $n$  为发育期排序，取值 1, 2, ...,  $n$ ； $N$  为形成 1 g 干物质需消耗 17 765 J 的热量<sup>[11]</sup>； $Q_p$  为该生长阶段的有效光辐射，估算为太阳总辐射的 45%，单位为  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ； $D$  为  $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$  与  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  量纲换算系数，为 10； $k_1$  为经济系数，取值 0.4； $k_2$  为干质量折算鲜果的系数，取值为 6.7。其他参数意义和取值见表 1。

高酸苹果光合生产潜力计算步骤如下：①根据高酸苹果试验点发育期实测结果，其发育期始期分别为发芽期 3 月 25 日，展叶期 4 月 10 日，花期 4 月 17 日，抽梢期 4 月 25 日，幼果期 5 月 10 日，新梢停止生长期 5 月 30 日，成熟期 10 月 5 日。本研究根据高酸苹果树不同生长阶段对太阳的反射率及漏光率等不同，将高酸苹果发育过程分为 2 个生长阶段：①发芽期-幼果期，3 月 26 日至 5 月 10 日，共 47 d；②幼果期-成熟期，5 月 11 日至 10 月 5 日，共 128 d。②根据董永祥等<sup>[16]</sup>、王连喜<sup>[17]</sup>的研究成果，利用宁夏各地太阳辐射总量，计算高酸苹果主要发育阶段太阳有效辐射量。③将各因子值与系数代入公式，得出高酸苹果光合生产潜力。

表 1 苹果光合生产潜力各参数的意义及取值

Table 1 The meaning and value of parameters of photosynthesis potential production of apple

参数	物理意义	发芽-幼果期取值	幼果-成熟期取值
$\alpha$	苹果树的反射率	0.15	0.10
$\beta$	树冠漏光率	0.45	0.13
$\gamma$	超过光饱和点光的比例	0.10	
$\delta$	苹果园裸露率	0.25	
$P$	非光合器官吸收光能	0.10	
$W$	呼吸消耗	0.50	
$Q$	光能转化率	0.25	

1.2.2 光温生产潜力 将光合生产潜力进行温度订正后称为光温生产潜力。以温度或其累积温度作为作物热量指标，已被广大的农业科技工作者所认可，苹果在其生长过程中对积温有一定要求，特别是  $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温尤为重要。另外，宁夏属大陆性气候，冬季寒冷且持续时间较长，因此，越冬期的低温为高酸苹果生产的重要不利影响因素<sup>[18]</sup>。当积温不足或最冷月日最低气温低于适宜最低气温上限值时，会导致生产潜力下降。因此，估算生产潜力时应消除  $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温及最冷月最低气温因素的影响，即温度订正系数由  $\geq 10^\circ\text{C}$  的活动积温订正系数及最冷月最低气温订正系数组成。温度订正系数估算数学表达式为：

$$K_t = K_{\geq 10^\circ\text{C}} \times K_d \quad (3)$$

式(3)中： $K_{\geq 10^\circ\text{C}}$  为  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温订正系数； $K_d$  为最冷月最低气温订正系数。

其中：

$$K_{\geq 10^\circ\text{C}} = \begin{cases} \frac{T_{\geq 10^\circ\text{C}}}{3\ 000} & T_{\geq 10^\circ\text{C}} \leq 3\ 000 \\ 1 & 3\ 000 < T_{\geq 10^\circ\text{C}} \leq 3\ 300 \\ \frac{3\ 000}{T_{\geq 10^\circ\text{C}}} & T_{\geq 10^\circ\text{C}} > 3\ 300 \end{cases} \quad (4)$$

$$K_d = \begin{cases} \frac{-20}{t_1} & t_1 \leq -20 \\ 1 & t_1 > -20 \end{cases} \quad (5)$$

式(4)和式(5)中， $T_{\geq 10^\circ\text{C}}$  为实测  $\geq 10^\circ\text{C}$  积温； $t_1$  为实测最冷月最低气温，为 1980-2015 年最冷月的最低气温平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 光合生产潜力

2.1.1 太阳有效辐射的计算 有效太阳辐射量约占太阳总辐射量的 45%，由此计算高酸苹果主要发育阶段的太阳有效辐射量(表 2)。可见，宁夏全区高酸苹果主要发育阶段太阳有效辐射为 1 409.8~1 809.2  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ，由北向南呈逐渐递减趋势。其中，灌区的陶乐、灵武光合有效辐射最丰富，在 1 800  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  以上；灌区其他地区及同心以北为 1 600~1 800  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ；海原及以南地区由于云雾日数较多，干扰了太阳的直接辐射，影响了到达地面的总辐射量，进而影响了有效辐射量，其有效辐射均在 1 600  $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$  以

表2 高酸苹果主要发育阶段有效太阳辐射

Table 2 The effective radiation of main growing stages of high acid apples

地名	有效太阳辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> )		地名	有效太阳辐射/(MJ·m <sup>-2</sup> )	
	发芽-幼果期	幼果期-成熟期		发芽-幼果期	幼果期-成熟期
大武口	428.3	1 355.0	中宁	415.7	1 360.1
惠农	427.4	1 370.1	盐池	409.3	1 333.3
贺兰	421.9	1 373.0	同心	400.8	1 318.2
平罗	426.8	1 369.4	兴仁	398.8	1 303.9
吴忠	417.2	1 366.0	韦州	395.0	1 294.9
银川	414.5	1 345.2	麻黄山	396.2	1 282.2
陶乐	425.3	1 383.9	海原	372.5	1 212.4
青铜峡	420.1	1 367.0	固原	369.6	1 181.0
永宁	415.8	1 350.8	西吉	356.1	1 122.6
灵武	421.7	1 383.0	隆德	348.4	1 089.8
中卫	415.8	1 331.4	泾源	345.7	1 064.0

下；泾源光合有效辐射相对最少，为1 409.8 MJ·m<sup>-2</sup>。按不同发育阶段分析，高酸苹果发芽~幼果期所需太阳有效光合辐射占整个发育期的23%~25%；幼果期~成熟期有效光合辐射占整个发育期的四分之三以上，是高酸苹果产量形成的关键时期。

2.1.2 光合生产潜力的计算 根据式(2)，通过计算高酸苹果主要发育阶段光合生产潜力，得出高酸苹果光合生产潜力(表3)。高酸苹果光合生产潜力为114.0~146.9 t·hm<sup>-2</sup>，其中，灌区各地及盐池均在141.0 t·hm<sup>-2</sup>以上；中部干旱带的韦州到海原以北，光合生产潜力为130.0~140.0 t·hm<sup>-2</sup>；海原及以南均在130.0 t·hm<sup>-2</sup>以下，明显小于灌区及中部干旱带高酸苹果光和生产潜力。高酸苹果光合生产潜力由北向南呈逐渐递减趋势，空间分布与太阳有效辐射一致。

表3 高酸苹果光合生产潜力

Table 3 Photosynthesis potential production of high acid apple

地名	光合生产潜力/(t·hm <sup>-2</sup> )			地名	光合生产潜力/(t·hm <sup>-2</sup> )		
	发芽-幼果期	幼果期-成熟期	光合生产潜力		发芽-幼果期	幼果期-成熟期	光合生产潜力
大武口	22.9	121.5	144.5	中宁	22.3	122.0	144.3
惠农	22.9	122.9	145.8	盐池	21.9	119.6	141.5
贺兰	22.6	123.2	145.8	同心	21.5	118.2	139.7
平罗	22.9	122.8	145.7	兴仁	21.4	117.0	138.3
吴忠	22.3	122.5	144.9	韦州	21.2	116.2	137.3
银川	22.2	120.7	142.9	麻黄山	21.2	115.0	136.2
陶乐	22.8	124.1	146.9	海原	19.9	108.7	128.7
青铜峡	22.5	122.6	145.1	固原	19.8	105.9	125.7
永宁	22.3	121.2	143.4	西吉	19.1	100.7	119.8
灵武	22.6	124.1	146.6	隆德	18.7	97.8	116.4
中卫	22.3	119.4	141.7	泾源	18.5	95.4	114.0

## 2.2 光温生产潜力

2.2.1  $\geq 10$  °C活动积温及最冷月最低气温订正系数的计算 利用宁夏信息中心所提供的 $\geq 10$  °C活动积温及最冷月最低气温资料，根据式(4)和式(5)计算 $\geq 10$  °C积温订正系数及最冷月最低气温订正系数。结果如表4。

2.2.2 光温生产潜力的计算 利用上述计算结果，根据式(3)，计算得出温度订正系数；再利用式(1)，得高酸苹果光温生产潜力(表5)。宁夏全区各地光温生产潜力为68.8~142.9 t·hm<sup>-2</sup>，其中，灌区各地及同心、韦州大于120.0 t·hm<sup>-2</sup>；中部干旱带其他地区至海原北部光温生产潜力在100.0~120.0 t·hm<sup>-2</sup>；海原及以南地区的阴湿地区光温生产潜力较低，为68.8~98.4 t·hm<sup>-2</sup>，较光合生产潜力有较大幅度减少，

表 4  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  积温订正系数及最冷月最低气温订正系数Table 4 Correction coefficient of accumulated temperature of  $\geq 10^{\circ}\text{C}$  and the lowest temperature of lowest month

地区	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温/ $^{\circ}\text{C}$	$K_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$	实测最冷月最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	$K_{t1}$	地区	$\geq 10^{\circ}\text{C}$ 活动积温/ $^{\circ}\text{C}$	$K_{\geq 10^{\circ}\text{C}}$	实测最冷月最低气温/ $^{\circ}\text{C}$	$K_{t1}$
大武口	3 648.7	0.90	-20.3	0.99	中宁	3 398.7	0.97	-21.6	0.93
惠农	3 367.1	0.98	-21.5	0.93	盐池	3 096.4	1.00	-23.6	0.85
贺兰	3 392.7	0.97	-22.2	0.90	同心	3 260.4	1.00	-21.3	0.94
平罗	3 376.1	0.98	-21.8	0.92	兴仁	2 670.9	0.89	-24.3	0.82
吴忠	3 366.5	0.98	-18.3	1.00	韦州	3 173.3	1.00	-20.3	0.99
银川	3 377.4	0.98	-24.9	0.80	麻黄山	2 535.0	0.85	-21.4	0.93
陶乐	3 366.5	0.98	-23.9	0.84	海原	2 466.1	0.82	-21.5	0.93
青铜峡	3 352.1	0.98	-19.0	1.00	固原	2 335.3	0.78	-22.8	0.88
永宁	3 293.1	1.00	-23.0	0.87	西吉	2 110.4	0.70	-23.9	0.84
灵武	3 283.9	1.00	-22.6	0.88	隆德	1 915.7	0.64	-21.6	0.93
中卫	3 210.4	1.00	-22.9	0.87	泾源	1 971.5	0.66	-20.8	0.96

说明南部山区高酸苹果的生产潜力明显受到气温的影响，气温是影响其生产潜力的又一重要因素。

表 5 温度订正系数及光温生产潜力

Table 5 Correction coefficient of temperature and light and temperature potential productivity

地区	$K_t$	光温生产潜力/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$	地区	$K_t$	光温生产潜力/ $(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$
大武口	0.891	128.7	中宁	0.899	129.7
惠农	0.912	132.9	盐池	0.847	119.9
贺兰	0.876	127.7	同心	0.939	131.2
平罗	0.897	130.7	兴仁	0.733	101.4
吴忠	0.980	142.0	韦州	0.985	135.3
银川	0.785	112.1	麻黄山	0.790	107.6
陶乐	0.820	120.5	海原	0.765	98.4
青铜峡	0.984	142.9	固原	0.683	85.9
永宁	0.870	124.7	西吉	0.589	70.5
灵武	0.885	129.8	隆德	0.591	68.8
中卫	0.873	123.7	泾源	0.632	72.0

### 3 结论与讨论

宁夏高酸苹果主要发育期内太阳有效辐射为  $1\ 409.8\sim 1\ 809.2\ \text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$ ，由北向南呈逐渐递减趋势。高酸苹果光合生产潜力为  $114.0\sim 146.9\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，与太阳光合有效辐射空间分布趋势一致；光温生产潜力为  $68.8\sim 142.9\ \text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。光照和温度为南部山区高酸苹果生产潜力的主要限制因子。通过与赵建国等<sup>[1]</sup>对宁夏灌区鲜食苹果生产潜力计算结果对比可知，高酸苹果光合生产潜力比鲜食苹果低  $15.4\%\sim 18.4\%$ ，而光温生产潜力比鲜食苹果高  $10.9\%\sim 30.1\%$ ，说明温度对鲜食苹果的限制作用大于对高酸苹果，高酸苹果对温度的要求低于鲜食苹果。高酸苹果生产潜力空间分布可分为灌区各地及中部干旱带东北部、中部干旱带其他地区至海原以北、海原以南 3 个地区，基本与宁夏自然地理分区一致。

已有的部分研究在估产时认为，苹果树在主要生长阶段中光能利用总是持续在一个水平上，但由于果树在不同生长阶段光能利用率是不同的，发芽-幼果期远比幼果-成熟期低得多，因此，本研究考虑了高酸苹果的不同生长阶段，利用光能的差异，进一步提高了估产精度，但未考虑降水、土壤及田间管理等因素对光温生产潜力的影响。今后将进一步研究。

### 4 参考文献

- [1] ALVES H M R, NORTCLIFF S. Assessing potential production of maize using simulation models for land evaluation in Brazil [J]. *Soil Use Manage*, 2006, **16**(1): 49 - 55.

- [2] TOMM O, DAVIDM L, ANDREWJ C, *et al.* Development and assessment of a coupled crop-climate model [J]. *Glob Change Biol*, 2007, **13**(1): 169 – 183.
- [3] FAO. *Reports on the Agro-ecological Zones Project* [R]. Rome: UN Food and Agricultural Organization, 1978 – 1981.
- [4] HIGGINS G M, KASSAM A H. Regional assessments of land potential: a fallow-up to the FAO/Unesco soil map of the world [J]. *Nat Resour*, 1982, **17**(4): 11 – 23.
- [5] 刘建栋, 周秀骥, 于强. FAO 生产潜力模型中基本参数的修正[J]. 自然资源学报, 2001, **16**(3): 240 – 247.  
LIU Jiandong, ZHOU Xiujie, YU Qiang. Modification of the basic parameters in FAO productivity model [J]. *J Nat Resour*, 2001, **16**(3): 240 – 247.
- [6] 刘布春, 王石立, 王玉平. 国外作物模型区域应用研究进展[J]. 气象科技, 2002, **30**(4): 193 – 203.  
LIU Buchun, WANG Shili, MA Yuping. The development of region applying of crop model abroad [J]. *Meteorol Sci Technol*, 2002, **30**(4): 193 – 203.
- [7] 王素艳, 霍治国, 李世奎, 等. 中国北方冬小麦的水分亏缺与气候生产潜力: 近 40 年来的动态变化研究[J]. 自然灾害学报, 2003, **12**(1): 121 – 130.  
WANG Suyan, HUO Zhiguo, LI Shikui, *et al.* Water deficiency and climatic productive potentialities of winter wheat in north of China: study on its dynamic change in recent 40 years [J]. *J Nat Dis*, 2003, **12**(1): 121 – 130.
- [8] 牛振国, 李保国, 张凤荣. 基于 GIS 的流域土壤水分补给量的模拟研究[J]. 水利学报, 2003(2): 73 – 77, 82.  
NIU Zhenguo, LI Baoguo, ZHANG Fengrong. Modeling of soil water replenishment in catchments based on GIS [J]. *J Hydr Eng*, 2003(2): 73 – 77, 82.
- [9] 王宗明, 张柏, 张树清, 等. 松嫩平原农业气候生产潜力及自然资源利用率研究[J]. 中国农业气象, 2005, **26**(1): 1 – 6.  
WANG Zongming, ZHANG Bai, ZHANG Shuqing, *et al.* Studies on agricultural climatic potential productivity and natural resources utilization ratio in Songnen plain of Heilongjiang Province [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2005, **26**(1): 1 – 6.
- [10] 高瑞, 夏斌, 乔红波. 河南省粮食生产潜力评价 GIS 设计与实现[J]. 光盘技术, 2008(11): 23, 25.  
GAO Rui, XIA Bin, QIAO Hongbo. Design and realization of GIS model for productivity evaluation system in Henan Province [J]. *CD Technol*, 2008(11): 23, 25.
- [11] 赵建国, 白敏. 苹果气候土壤生产潜力估算方法研究[J]. 北方园艺, 1990(1): 1 – 3.  
ZHAO Jianguo, BAI Min. Research of estimation method of climate and soil potential productivity of apple [J]. *Northern Hortic*, 1990(1): 1 – 3.
- [12] 杨振伟. 昌黎地区辐射资源与苹果生产潜力的研究[J]. 中国农业气象. 1993, **14**(4): 12 – 14.  
YANG Zhenwei. Research of radiation resource and potential productivity of apple at Changli [J]. *Chin J Agrometeorol*, 1993, **14**(4): 12 – 14.
- [13] 杨永岐, 戴阁文. 苹果气候生产潜力研究[J]. 辽宁气象, 1993(4): 18 – 20.  
YANG Yongqi, DAI Gewen. Research of climate potential productivity of apple [J]. *Liaoning Meteor Quart*, 1993(4): 18 – 20.
- [14] 徐文修, 牛新湘, 边秀举. 新疆棉花光温生产潜力估算与分析[J]. 棉花学报, 2007, **19**(6): 455 – 460.  
XU Wenxiu, NIU Xinxiang, BIAN Xiujie. The calculations and analyses on thermal production potential of cotton in Xinjiang [J]. *Cotton Sci*, 2007, **19**(6): 455 – 460.
- [15] 段晓凤, 孙彦坤, 武帆, 等. 黑龙江省黑土区气候-土壤生产潜力分析[J]. 中国农业气象, 2009, **30**(3): 394 – 400.  
DUAN Xiaofeng, SUN Yankun, WU Fan, *et al.* Analysis of climate-soil potential productivity in black soil region of Heilongjiang Province [J]. *Chin J Agrometeorol*, 2009, **30**(3): 394 – 400.
- [16] 董永祥, 周仲显. 宁夏气候与农业[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 1986: 2 – 3.
- [17] 王连喜. 宁夏农业气候资源及其分析[M]. 银川: 宁夏人民出版社, 2008: 9 – 22.
- [18] 张磊, 卫建国, 段晓凤, 等. ‘澳洲青苹’在宁夏的生态适应性分析[J]. 中国农学通报, 2015, **31**(19): 48 – 53.  
ZHANG Lei, WEI Jianguo, DUAN Xiaofeng, *et al.* Ecological suitability analysis of ‘Granny Smith’ in Ningxia [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2015, **31**(19): 48 – 53.