

基于 CASA 模型的玉溪市 NPP 时空变化分析^{*1}

吴琼¹, 王金亮¹, 李佳¹, 段平¹, 李石华^{1, 2}

(1. 云南师范大学旅游与地理科学学院, 云南昆明 650500;

2. 云南省基础地理信息中心, 云南昆明 650500)

【摘要】:净初级生产力是陆地生态系统碳汇的决定因子,是生态系统中物质与能量流动研究的基础。为了解玉溪市净初级生产力时空变化情况及其与影响因子的相互关系,利用 CASA 模型对玉溪市 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年净初级生产力进行了估算,并从时间、空间变化及其与 DEM、NDVI 等的空间关系进行了分析。结果表明:①玉溪市 15 年间净初级生产力均值呈先“减小后增大再减小”的趋势。②各地区净初级生产力空间差异明显,西南部地区最高,东北部地区最低;15 年间西部与西南部地区减少较明显,北部与东北部地区增加较明显。③净初级生产力均值总体随海拔的上升而增大,与 DEM、NDVI 呈正相关。在海拔较高区域,与 NDVI 相关性较大;在海拔较低区域,与 DEM 相关性较大。

【关键词】:玉溪市;净初级生产能力;CASA 模型;时空变化;植被覆盖度

【中图分类号】:X826. 2 **【文献标志码】**:A **【文章编号】**:1005-8141(2017)07-0777-06

1 引言

陆地植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是指陆地植物光合作用积累的有机质干物质总量。即在单位面积、单位时间上,由光合作用产生的有机质总量和呼吸作用消耗有机质量的差值,表征着植被的固碳能力,反映了植物转化和固定光合产物的效率^[1]。NPP 估算的模型方法依据其计算机理主要有气候生产力模型、生理生态过程模型、光能利用率模型和生态遥感耦合模型 4 种^[2],其中气候生产力模型最为简单且参数易获取,但估算误差较大,适用于区域潜在 NPP 估算;生理生态过程模型估算较准确,但模型较复杂,参数较多且难获取,适用于小尺度均质斑块 NPP 的估算;光能利用率模型尺度转换相对容易且植被参数可由遥感数据获取,适用于区域估算;生态遥感耦合模型是生理生态过程模型和光能利用率模型的结合,兼具其优缺点,但有参数难于获取的弊端,估算受叶面积指数(LAI)的影响较大。综上所述,同时考虑参数获取难易程度与估算结果的准确性,光能利用率模型成为 NPP 估算的主要模型。其中,基于 GIS 和 RS 技术的 CASA 模型充分考虑了 NPP 计算中最主要的两个驱动变量,同时参数需求较少,避免了参数估算带来的误差,在国内外得到广泛应用^[3, 4]。

我国曾对不同区域,如平原、高原、丘陵、山区等地的 NPP 开展了研究工作^[5]:如根据生态系统过程模型对我国三江平原

¹ 收稿日期:2017-05-21; 修订日期:2017-06-14

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:41561048);国家测绘地理信息局地理国情监测示范项目“抚仙湖流域生态环境动态监测”(编号:测国土函[2014]35号)。

第一作者简介:吴琼(1991-),女,山西省晋中人,硕士研究生,主要研究方向为资源环境遥感应用。

通讯作者简介:王金亮(1963-),男,云南省武定人,教授,博士生导师,主要研究方向为资源环境遥感应用。

NPP 变化及其主要影响因素进行了研究^[6]；依据 CASA 模型，估算了青藏高原和全国净初级生产力，并分析其空间格局^[7]；结合 MODIS 数据模拟了福建省森林生态系统 NPP，对其影响因子进行了分析^[8]；基于气候变化下的长白山阔叶红松林 NPP 变化与响应研究^[9]等，但是对地形较复杂的西南地区研究鲜见。

玉溪市位于云南省中部地区，紧邻省会昆明，享有“滇中粮仓”和“云烟之乡”的美誉，同时也是抚仙湖、哀牢山、阳宗海等著名风景区的所在地。云南省玉溪市动植物种类繁多，植物种类达 2000 多种，属国家重点保护的有 28 种，包括国家森林公园 2 个、国家级自然保护区 1 个、省级自然保护区 1 个、地县级自然保护区 17 个。因此，无论是从景区维护还是物种保护方面，对玉溪市的 NPP 研究都显得尤为重要。此外，玉溪市地势西北高、东南低，山地、峡谷、高原、盆地交错分布，位于新平县的哀牢山主峰为最高峰，海拔 3165.9m，最低海拔为元江河谷，海拔 328m，相对高差 2838m，十分有利于研究区域 NPP 在不同海拔范围内与 DEM、NDVI 等因子的相关性。

为了详细了解玉溪市 NPP 的时空变化，探讨玉溪市与各影响因子的相关性，本文将运用 CASA 模型逐像元模拟 2000—2015 年玉溪市 NPP 分布及其时空变化，分析与各影响因子的相关性。该研究成果有利于进一步了解玉溪市植被空间布局与承载力现状，对评估各县区生态平衡状况具有重要的参考价值。

2 研究区与数据来源

2.1 研究区概况

玉溪市的地理坐标为 23° 19'—24° 53' N、101° 16'—103° 09' E 之间，位于云南省中部地区，全市总面积 15285km²，分 2 个市辖区、5 个县、3 个自治县，属于低纬度高原区。玉溪市的气候随复杂地形变化，年平均气温 15.4—24.2℃，年平均降水量 787.8—1000mm，多集中于 6—10 月，相对湿度 75.3%，年平均蒸发量 1801mm。由于玉溪市的地形高差较大、地形复杂，一般山区比坝区降雨量大、温度较低，从山顶到谷底，全年和昼夜温差变化较显著。

2.2 数据来源

本研究主要采用遥感数据、气象数据和其他空间数据。遥感数据主要包括 2000 年、2005 年、2010 年、2015 年 1—12 月份的 MODISNDVI 产品数据；2000 年、2005 年、2010 年、2015 年的 TM 影像数据(利用监督分类与目视解译的方法得到各年土地利用数据)；气象数据包括玉溪市 8 个站点的实测数据，主要有日照时数、月均温、月降水量、局地潜在蒸散量等，其他空间数据包括玉溪的市行政区划数据等。

3 研究方法及其计算

本文采用 CASA 模型估算玉溪市的 NPP。NPP 的计算与植物光合有效辐射 (APAR) 和实际光能利用率 (ϵ) 两个因子相关^[3, 10]，计算公式为：

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \dots\dots\dots (1)$$

两个参数的具体计算方法见 APAR 的估算和 ϵ 的估算。

3.1 APAR 的估算

APAR 的主要影响因子有植被所能吸收的太阳有效辐射、植被对入射光合有效辐射的吸收比例，其代数关系式为：

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \dots\dots\dots (2)$$

式中，SOL(x, t)为 t 月在像元 x 处的太阳总辐射量(gC/m²·month)，可根据各站点日照时数求得太阳总辐射量，采用 IDW 插值法求得各像元总辐射量；0.5 表示植被可利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例^[3, 10, 11]；FPAR(x, t)是指植被对入射光合有效辐射的吸收比例，它同时与 NDVI、SR 相关。

根据 FPAR 与 NDVI 的线性关系^[10, 12, 13]，利用像元二分模型做出各地物掩膜文件，并得出不同地物各像元的 NDVI 值，同时用各地物分类矢量文件裁剪出不同地物的 NDVI，得到其最大值和最小值，代入式(3)求得 FPAR_{NDVI}。

$$FPAR(x, t) = \frac{(NDVI(x, t) - NDVI_{i, min})}{(NDVI_{i, max} - NDVI_{i, min})} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min} \dots\dots\dots (3)$$

式中，NDVI_{i, max}、NDVI_{i, min} 分别表示第 i 种植被类型 NDVI 最大值、最小值；各像元 NDVI 值根据 MODIS、NDVI 产品数据获取。

根据 FPAR 与 SR 的线性关系^[1, 10, 14, 1]，与 Step1 同理求得各像元 SR 值、不同地物 SR 最大值和最小值，代入式(4)求得 FPAR_{SR}。

$$FPAR(x, t) = \frac{(SR(x, t) - SR_{imin})}{(SR_{i, max} - SR_{i, min})} \times (FPAR_{max} - FPAR_{min}) + FPAR_{min} \dots\dots\dots (4)$$

式中，FPAR_{min}、FPAR_{max} 分别取值 0.001、0.95；SR_{i, max}、SR_{i, min} 分别表示第 i 种植被类型的 NDVI 在 95%和 5%下的百分位数^[18, 26]。SR(x, t)由式(5)求得：

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \dots\dots\dots (5)$$

对 FPAR_{NDVI} 和 FPAR_{SR} 估算结果进行对比分析，发现由 NDVI 估算的 FPAR 比实测值高，而由 SR 估算的 FPAR 比实测值低，因此依据式(6)取其平均值作为 FPAR 最终估算值^[1, 10, 15]（本研究 α 取 0.5）。

$$FPAR(x, t) = \alpha FPAR_{NDVI} + (1 - \alpha) FPAR_{SR} \dots\dots\dots (6)$$

根据以上方法，可求得 APAR 因子。

3. 2 ϵ 的估算

光能利用率是指在一定时期内植被单位面积上干物质中所包含的化学潜能，与同一时间投射到该面积上的光合有效辐射能之比。主要与温度对光能利用率的胁迫作用、水分胁迫影响系数、最大光能利用率相关，其代数关系式为：

$$\epsilon(x, t) = T_{\epsilon_1}(x, t) \times T_{\epsilon_2}(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \dots\dots\dots (7)$$

$T_{\epsilon_1}(x, t)$ 是指在低温或高温条件下，植物内在的生化作用会对光合作用产生一定的限制，从而降低植物第一性生产力。具体的计算公式为：

$$T_{\epsilon_1}(x, t) = 0.8 + 0.02 \times T_{opt}(x) - 0.0005 \times [T_{opt}(x)]^2 \dots\dots\dots (8)$$

式中， $T_{opt}(x)$ 表示最适宜植物生长温度，取研究区一年内 NDVI 值最高时的当月平均气温(°C)。

$T_{\epsilon_2}(x, t)$ 是指当植物生长的环境温度从最适宜温度 $T_{opt}(x)$ 向高温或低温变化时，植物光能利用率有变小趋势，该因子主要与当月各像元的温度相关，代数关系式为：

$$T_{\epsilon_2}(x, t) = \frac{1.184}{\{1 + \exp [0.2 \times (T_{opt}(x) - 10 - T(x, t))]\}} \times \frac{1}{\{1 + \exp [0.3 \times (-T_{opt}(x) - 10 + T(x, t))]\}} \dots\dots\dots (9)$$

式中， $T(x, t)$ 表示 t 月份像元 x 处的温度，采用 IDW 插值法对各气象站点月均温插值得到。

水分胁迫影响系数 $W_{\epsilon}(x, t)$ 表示植物所能利用的有效水分条件对光能利用率的影响，主要与区域实际蒸散量 $E(x, t)$ 、区域潜在蒸散量 $E_p(x, t)$ 相关，计算式为式(10)； $E(x, t)$ 又由 $P(x, t)$ 和 $R_n(x, t)$ 决定，计算式为式(12)； $P(x, t)$ 为 t 月份内像元 x 处的降水量(mm)，同样采用 IDW 插值法对气象站点月降雨量插值计算获取； $R_n(x, t)$ 利用经验公式(12)求得。

$$W_{\varepsilon}(x, t) = 0.5 + 0.5 \times E(x, t) / E_p(x, t) \dots\dots\dots (10)$$

$$E(x, t) = \frac{\{P(x, t) \times R_n(x, t) \times [P(x, t)^2 + R_n(x, t)^2 + P(x, t) \times R_n(x, t)]\}}{\{[P(x, t) + R_n(x, t)] \times [P(x, t)^2 + R_n(x, t)^2]\}} \dots\dots\dots (11)$$

$$R_n(x, t) = [E_{p0}(x, t) \times P(x, t)]^{0.5} \times \{0.369 + 0.589 \times \left[\frac{E_{p0}(x, t)}{P(x, t)} \right]^{0.5}\} \dots\dots\dots (12)$$

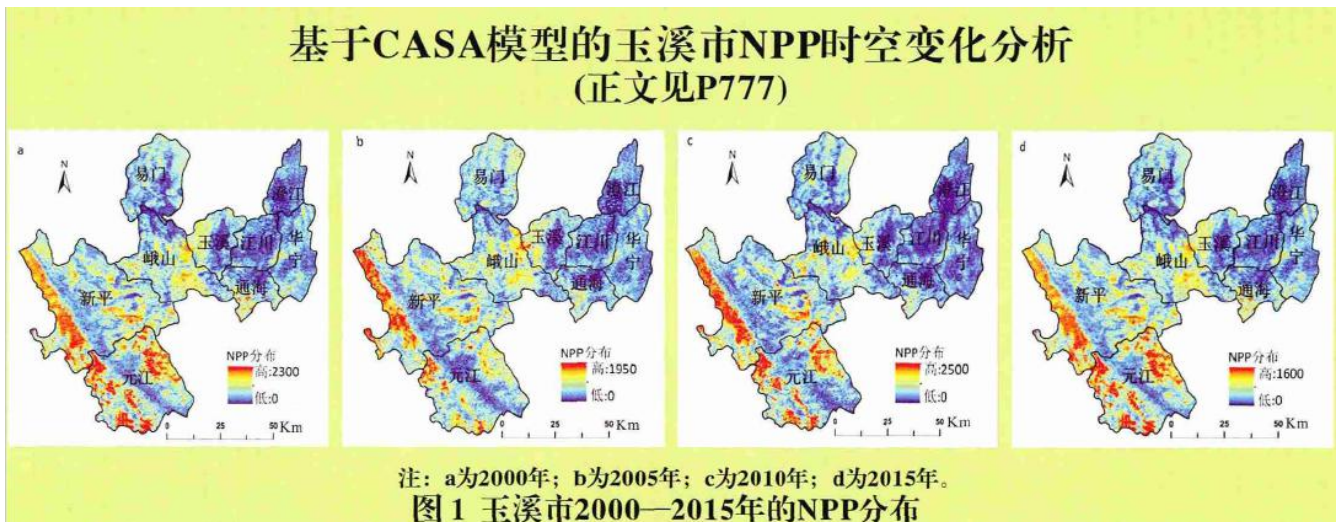
对不同植被类型的月最大光能利用率 ε_{\max} 的取值不同, 本文参照中国典型植被类型最大光能利用率模拟的结果^[16], 结合本研究的分类结果, 归类得出不同生态类型的光能利用率取值(表1), 根据以上公式可求得 ε 因子。

表1 不同生态类型的光能利用率取值(gC/MJ)

生态类型	林地	耕地	水体	裸地	居民地
ε_{\max}	0.558	0.292	0.252	0.218	0.188

4 玉溪市 NPP 估算与分析

我们将估算的植被光合有效辐射(APAR)和实际光能利用率(ε)代入式(1), 求得玉溪市2000年、2005年、2010年、2015年4期的NPP分布(图1, 见封三)。根据图1可见, 各区域4期的NPP分布趋势大体相同, 均表现东北部地区较小、西部和西南部地区较大。根据统计分析, 2000年的NPP均值为830.052g/m²·a、2005年为616.126g/m²·a、2010年为776.424g/m²·a、2015年为593.213g/m²·a, 总体呈“先减小后增大”的趋势。在高程较高的新平哀牢山地区 and 元江西部地区的NPP值均较大, 分析认为NPP与DEM存在一定程度的正相关性。在植被覆盖水平相对较低的澄江、华宁、玉溪、通海、易门等地, 海拔较高, 但NPP相对较低, 据此分析NPP与NDVI也存在一定程度的正相关性。



4.1 玉溪市的NPP时空变化

分析4期NPP结果,玉溪市NPP总体呈现明显的空间分异(图1,见封三),其中西南部地区均值最高。元江地区属中部高原温暖区,适宜各种植被生长,15年间NPP年平均值高达 $492.761\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{a}$,新平地区为 $405.669\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{a}$;东北部地区NPP均值最低,以水体流域最多的澄江最低,15年平均值为 $200.063\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{a}$;其次华宁地区为 $296.197\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{a}$;中部地区15年间NPP均值在 $300\text{--}400\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{a}$ 之间变化。

15年间玉溪市NPP均值总体呈“先减小后增大再减小”的趋势(图2),同时各县区NPP也呈同样的趋势(图3)。NPP最小值出现在2015年($593.213\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{a}$),最大值出现在2000年($830.052\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{a}$),15年间总量减少较明显。

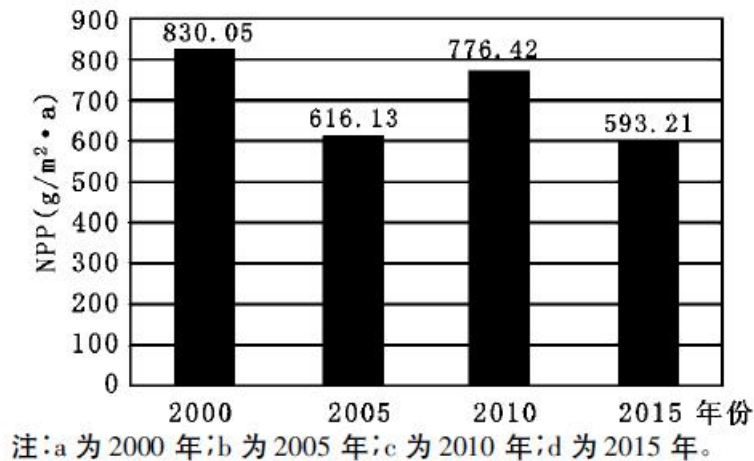


图2 玉溪市NPP总量均值直方图

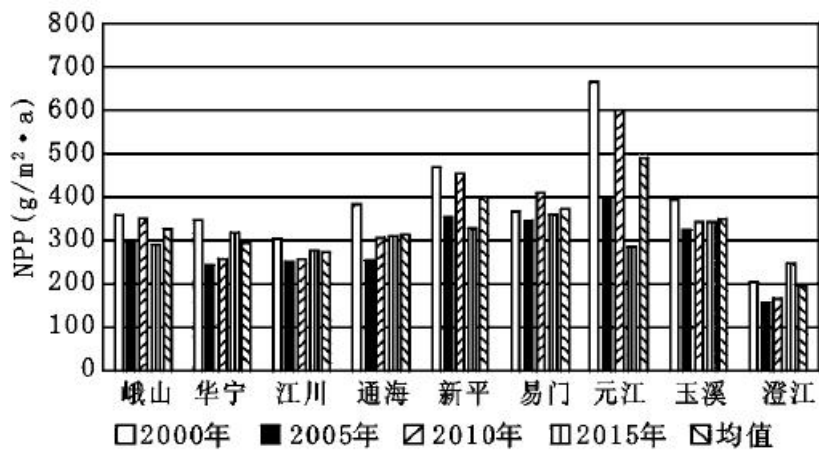
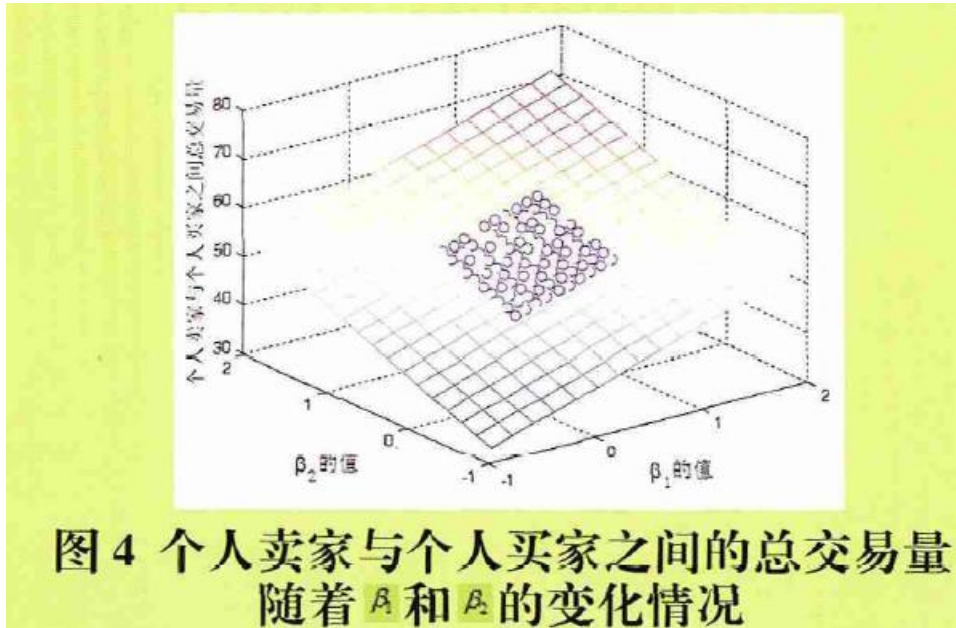


图3 玉溪市2000—2015年各县区NPP均值分布

从不同地区变化趋势看(图4,见封三),15年间新平的西部地区、元江的西部和东北部地区由于受气候影响NPP均值减少较明显,澄江、华宁、江川、易门的部分地区有所增加,中部地区变化幅度较小。



4. 2 NPP 与 DEM、NDVI 的关系

为了研究玉溪市 NPP 在不同范围内对 DEM、NDVI 的不同响应,我们选取研究区某区域绘制一条剖面直线,分别得到 NPP、DEM、NDVI 空间剖面曲线图。以 DEM 等于 1500m 为界,分别研究不同高程范围内 NPP 与 DEM、NDVI 的相关性。研究表明,在玉溪市高程范围内,NPP 与 NDVI、DEM 均呈现正相关性。但高程大于 1500m 时,NPP 与 NDVI 相关性较大(图 5);小于 1500m 时,NPP 与 DEM 相关性较大(图 6)。究其原因是:在一定范围内随着海拔的上升,降水量逐渐增大,上升到一定高度时,降水量又随之减小;其次,太阳总辐射量随海拔升高而不断增大,增长速度为先快后慢。综合两者在海拔较小时,降水量和太阳总辐射量随海拔升高,正向变化较明显;而在海拔较大的区域,降水量变小,太阳辐射量增加变慢,所以在海拔较低(DEM 较小)区域的 NPP 与 DEM 相关性更高。此外,在海拔较高区域(DEM 较大),植被类型多样化、植被保护较好;低海拔区域的人为活动特别是城镇建设用地较多,植被幅度较低,因此也表现出海拔较高区域的 NPP 与 NDVI 相关性更高。结合本文剖面线的选取位置(高海拔区域剖面线在澄江、江川、通海地区;低海拔区域剖面线在新平、元江的河谷地区),澄江、江川、华宁、通海等地 NPP 受 NDVI 的影响较大,因此这些区域植被类型与数量的保护显得尤为重要。峨山、新平、元江的河谷地带,由于海拔较低,NPP 受 DEM 影响更大,但并不否决 NDVI 的变化作用,只是在 NDVI 同等变化情况下,澄江、江川等高海拔地区 NPP 的响应强于元江、峨山等低海拔地区。

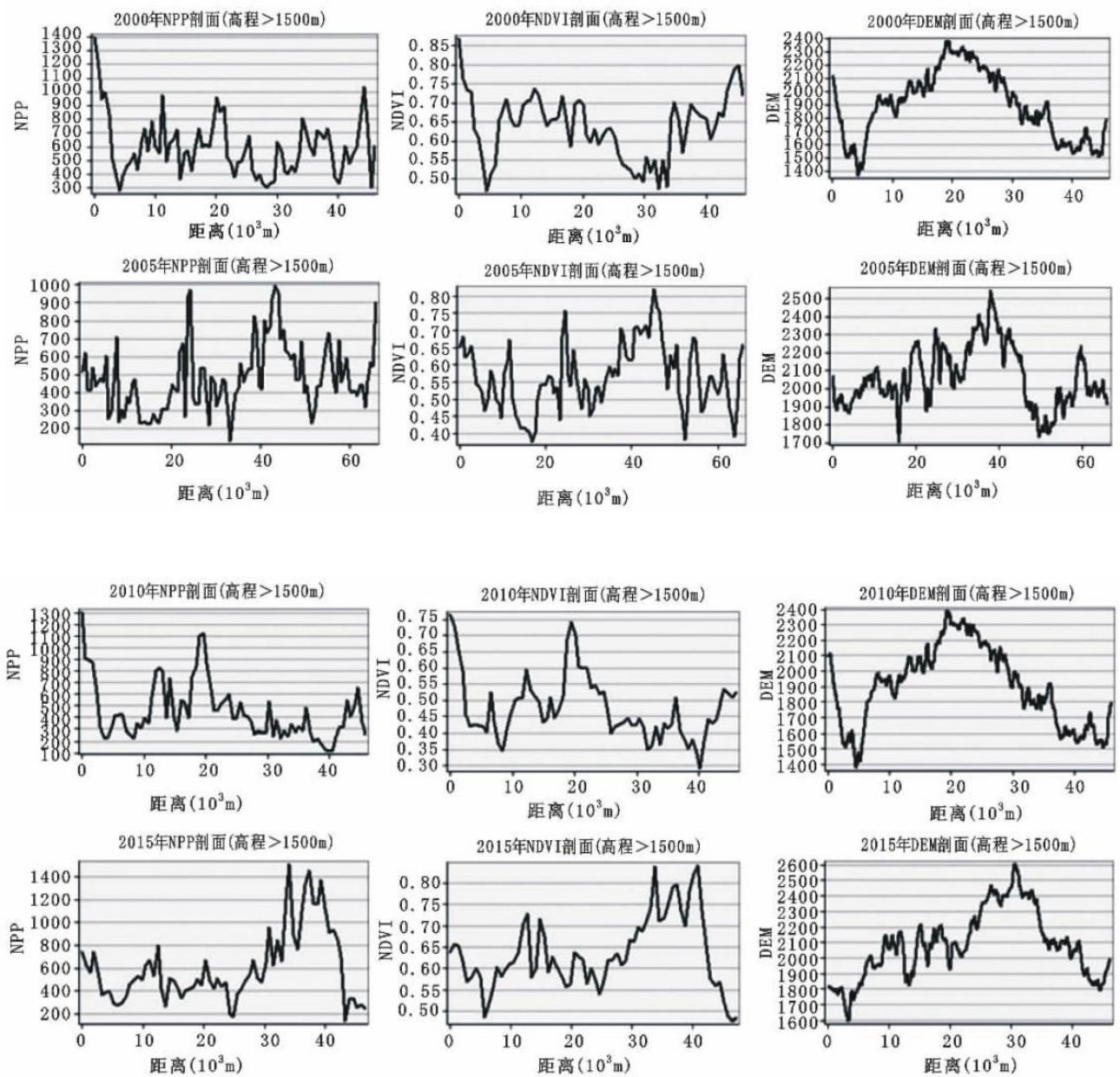


图5 玉溪市2000年—2015年(高程>1500m)NPP、NDVI、DEM剖面图

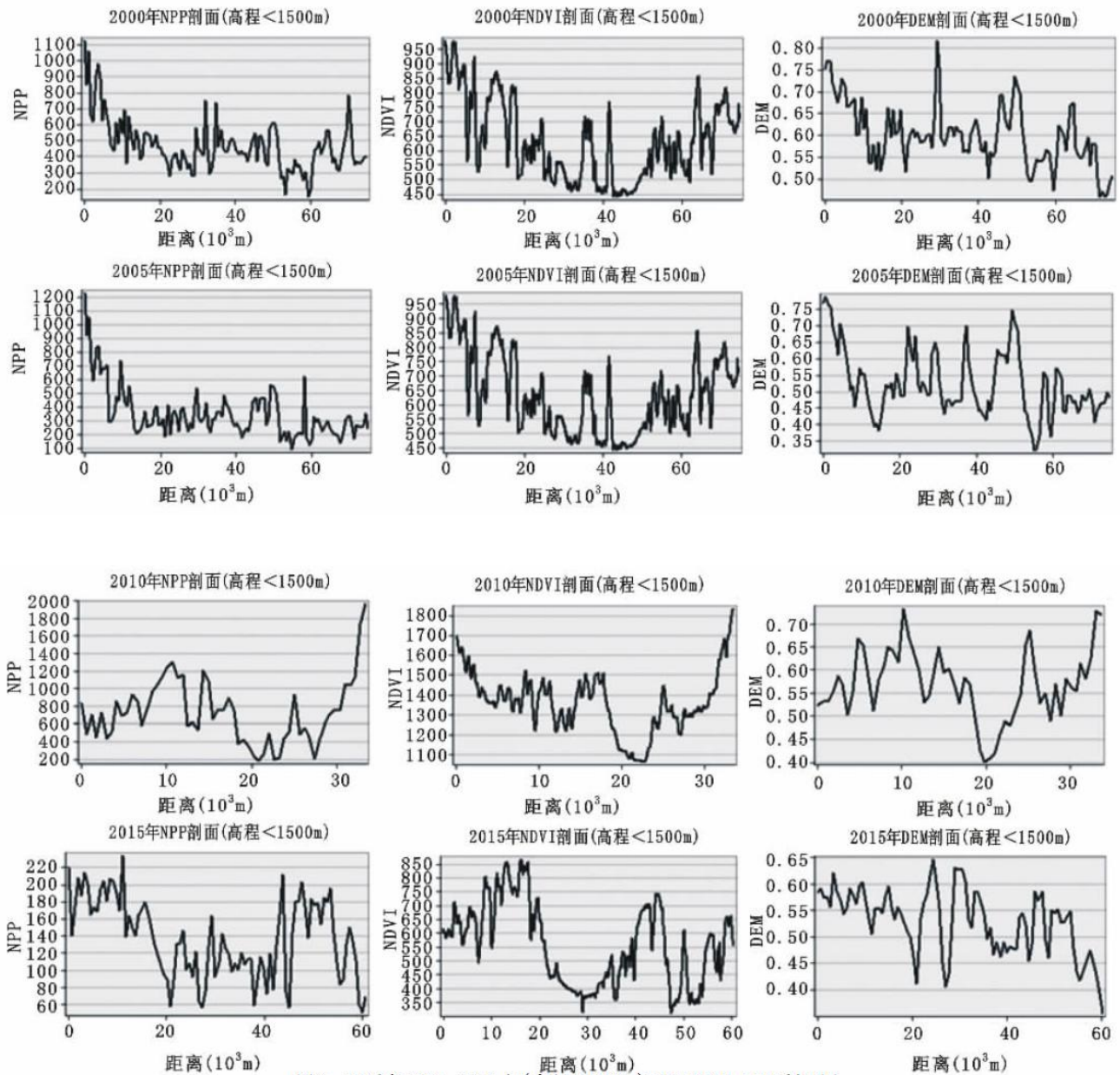


图6 玉溪市2000—2015年(高程<1500m)NPP、NDVI、DEM剖面图

5 精度评价分析

玉溪市的NPP误差来源主要有两个方面:一是各气象数据的选择,二是通过监督分类得到的遥感影像分类结果。本文气象数据均来自云南省气象局,较为准确,因此主要进行监督分类的精度验证。我们将研究区分为林地、耕地、水体、居民地、草地5类,采用Google Earth随机选取若干验证样本区,通过计算分类混淆矩阵和Kappa系数,完成了分类结果的精度验证,见表2。从表2可见,玉溪市各年份Kappa系数均大于0.75,表明分类结果较为理想。

表2 影像分类精度检验结果

序号	年份	Kappa 系数	总体精度(%)
1	2000	0.81	89.28
2	2005	0.75	85.88
3	2010	0.84	91.20
4	2015	0.89	94.33

6 结语

利用遥感影像数据、气象数据,根据 CASA 模型可较为准确地对玉溪市 NPP 值进行估算。估算结果表明,2000—2015 年十五年间玉溪市的 NPP 均值呈现“先减小后增大再减小”的趋势;各区域变化有所差异,隶属低海拔区域的新平东部地区和峨山的西南部地区 NPP 的变化不大,玉溪市低海拔区域玉溪市 NPP 与 DEM 表现出较高的相关性,澄江、华宁、江川、易门部分地区有所增加;结合 NPP 与 NDVI、DEM 的相关性,玉溪市该区域的 NDVI 提高较大(高海拔区域 NPP 与 NDVI 相关性更强),说明澄江、华宁、易门各县近年来政府对生态环境保护力度较大,各植被生长状态较好,区域基本保持了生态平衡。但同属玉溪市高海拔地区的新平西部(主要集中在哀牢山地区)、元江西部和东北部地区的 NPP 减少明显,一方面是由于城市化发展过程对城市建筑、道路等建设的需求,导致对林地、草地等植被覆盖区域的占用;另一方面则是人们不重视保护环境。因此,我们建议当地有关部门在城市化进程中协调好城镇建设与区域生态开发的比重,加大环境监测力度,减少对山区的开发,尤其像哀牢山一类难以恢复的景区地区禁止砍伐森林,避免大面积高植被覆盖度林区减少。

参考文献:

- [1] 俞静芳. 基于 CASA 模型的浙江省植被净初级生产力估算 [J]. 浙江农林大学学报, 2012, 29(4) : 473 - 481.
- [2] 陈雯, 孙成明, 刘涛, 等. 植被 NPP 估算的模型方法与机理 [J]. 安徽农学通报, 2014, (8) : 30 - 33.
- [3] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 等. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例 [J]. 遥感学报, 2005, 9(3) : 300 - 307.
- [4] Donmez C, Berberoglu S, Curran P J. Modelling the Current and Future Spatial Distribution of NPP in a Mediterranean Watershed [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(3) : 336 - 345.
- [5] 杜虹蓉. 基于 CASA 模型的中山峡谷区县域植被 NPP 时空变化研究 [D]. 昆明: 云南大学硕士学位论文, 2015.
- [6] 王宗明, 国志兴, 宋开山, 等. 2000—2005 年三江平原土地利用/覆被变化对植被净初级生产力的影响研究 [J]. 自然资源学报, 2009, (1) : 136 - 146.
- [7] 秦瑞, 周瑞伍, 彭明春, 等. CASA 模型在金沙江流域(云南部分) NPP 研究中的应用 [J]. 山地学报, 2014, (6) : 698 - 705.
- [8] 江洪, 汪小钦, 孙为静. 福建省森林生态系统 NPP 的遥感模拟与分析 [J]. 地球信息科学学报, 2010, 12(4) : 580

- [9] 吴玉莲, 王襄平, 李巧燕, 等. 长白山阔叶红松林净初级生产力对气候变化的响应: 基于 BIOME — BGC 模型的分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2014, 50(3) : 577 — 586.
- [10] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算 [J]. 植物生态学报, 2007, 31(3) : 413 — 424.
- [11] 刘广. 京津冀地区森林植被净初级生产力遥感估算研究 [D]. 北京: 北京林业大学硕士学位论文, 2008.
- [12] Monteith J L. Solar Radiation and Productivity in Tropical Ecosystems [J]. Journal of applied ecology, 1972, 9(3) : 747 — 766.
- [13] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the Estimation of Terrestrial Net Primary Production from Remotely Sensed Data [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1994, 99(D3) : 5263 — 5283.
- [14] Los S, Justice C, Tucker C. A Global 1 by 1 Degree NDVI Dataset for Climate Studies Derived from the GIMMS Continental NDVI Data [J]. 1994, (15) : 3493 — 3518.
- [15] 李旭谱. 黑河流域 NPP 遥感估算及其时空变化特征分析 [D]. 西安: 陕西师范大学硕士学位论文, 2013.
- [16] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 等. 中国典型植被最大光利用率模拟 [J]. 科学通报, 2006, 51(6) : 700 — 706.