气象网格数据的快速渲染研究与应用

陈楠　杨和平*　霍子墨　陈京华　王洁

（国家气象信息中心，北京 100081）

摘要　随着更高精度的气象网格数据在气象业务中的广泛应用，使用高精度网格数据为社会公众提供精细化气象服务的需求越来越旺盛。针对气象网格数据文件大，网页前端动态渲染效率低等问题，提出基于瓦片金字塔模型的网格数据快速传输和渲染技术的研究及应用。采用服务器端的金字塔模型的瓦片动态切割、压缩传输以及浏览器终端的插值和渲染等技术，实现基于B/S框架下HTML5的气象网格数据快速展示的流程。同时，利用中国区域1 km分辨率多源融合实况分析产品，基于微信小程序终端进行检验发布，试验结果表明，百兆级气象网格数据可视化更新时间达毫秒量级，可以广泛应用于各类空间网格数据高效可视化的页面渲染。

关键词　可视化；瓦片金字塔；渲染；WebGL；气象网格数据

中图分类号：P409　**DOI**：10.19517/j.1671-6345.20210491　**文献标识码**：A

引言

气象数据具有时间连续性和空间分布的特点，通常可与地理信息结合展示。因此，基于GIS的可视化表达方式在气象业务和公众服务中的需求十分旺盛。近年来，“小巧轻便”及“通信便捷”的移动互联网[1-2]快速发展，促使气象服务走向移动手机端。借助B/S框架下的HTML5技术可以使气象数据通过手机移动端传播更加方便快捷[3-4]。

美国NASA基于Java的NetCDF开发包发布了客户端Panoply软件，可以展示气象网格数据。虽然这种专业化安装版的可视化工具功能较为完备，但需要在电脑进行本地安装，且对电脑配置有一定要求。随着移动互联网技术的发展和智能移动设备的普及，这类专业工具无法满足社会公众随时随地获取气象服务的需求。美国NullSchool针对ECMWF数据，设计了全球可视化展示系统(nullschool.net)。东京气象局参考美国NullSchool的技术框架，研发了Tokoyo Wind Map实现了网页端的快速可视化，但移动端仍存在不兼容的问题，且地图是50 km或110 km分辨率海岸线轮廓底图。Windy及Ventusky等公司综合考虑了多平台的应用技术，使用全球范围的最小分辨率9 km气象网格数据进行瓦片切割，基于OpenStreetMap在线地图实现了PC浏览器及智能手机APP的应用[5-6]。国内天气类APP如彩云天气、墨迹天气、中国气象、中国天气通等主要以文字、图标方式在手机、平板电脑等智能移动终端上提供天气预报资讯和生活指数，部分提供卫星云图和雷达图。从国内外气象可视化服务的现状考虑，仍存在如下问题：①手机CPU在性能、图形处理、缓存等方面都低于电脑PC机，想要提供更高精度的气象可视化服务有一定的挑战，特别是移动端页面渲染很难确保效率同时兼顾数据准确性[7]。②天气类App服务方式单一，使用气象网格数据进行时空可视化展示不足。现有App，特别是国内天气类App，主要提供天气预报和预警服务，气象要素呈现方式单一，侧重文字图标类描述。③使用气象网格数据进行时空可视化精度不高。如Windy采用了全球范围GFS 22 km和ECMWF 9 km分辨率网格数据，仅对大尺度范围服务有较好的用户体验。而气象业务和社会公众需要更高精度、更加精准的气象服务。中国气象

国家科技基础条件平台建设专项资助

作者简介：陈楠，女，1988年生，硕士，高级工程师，主要研究方向为气象数据分析与处理，Email：nanchen88@126.com

收稿日期：2022年11月6日；定稿日期：2023年1月5日

* 通信作者，Email：yanghp@cma.gov.cn

局于 2021 年发布 1 km 分辨率多源融合气象实况网格数据[8-9],单个文件大小约 100 MB,直接加载连续时次的多个文件并实现可视化展示会出现响应慢、卡顿、图片不完整等现象。④手机需要下载安装相应天气类应用程序才能使用,占用手机内存资源较大。一旦更新版本,用户需要重新下载。

因此,如何将包含地理信息的气象数据在手机端快速、动态、无卡顿、美观地可视化展示成为当前的研究热点。针对以上需求,本文构建了一个基于微信小程序的气象数据可视化服务系统,该系统利用中国区域 1 km 分辨率多源融合实况分析产品,在微信小程序开发平台下利用 HTML5、Node.js、leaflet、WebGL、Canvas 等技术,实现手机端气象时空数据的快速传输和渲染,模拟天气过程的实时快速演变。

1　系统设计

为实现气象数据快速可视化渲染,本文实现方式主要包括后台对气象网格数据进行图像处理,存储为二进制瓦片文件并启用压缩算法,利用 GeoServer 技术实现动态切片的发布;页面前端通过控制地图比例尺,加载对应层级的可视范围内瓦片数据,进而实现在快速加载尽量少的数据情况下保证展示的精度。另外,微信小程序具有轻便灵活,多平台共享的优点。由于无需下载,即点即用的特性,故用户体验更高[10-11]。本系统依托微信小程序平台,开发基于 Vue 框架的 HTML5 页面,并将整个流程转化为气象时空数据的输入和输出过程。系统框架及数据处理流程如图 1 和图 2 所示。

后台系统输入:基于气象大数据云平台“天擎”获取气象网格数据作为输入数据[12-16]。气象数据需要考虑数据类型、数据格式、数据组织与表达、数据管理等方面,其中气象数据格式多为属性数据、矢量数据、网格数据;数据表达形式分为离散数据、网格数据、统计数据。由于业务中主要应用网格数据,离散站点数据也可以转化成矩阵网格类数据,因此本系统主要研究气象网格数据[17]。

后台数据处理:气象数据输入后对气象网格数据进行多级切片切割、数据压缩。

前端页面输出:请求并获取数据后,基于 WebGL[18-19] 技术对气象网格数据结合时间和空间在电子屏幕上实现动态演变过程的处理,包含前端插值

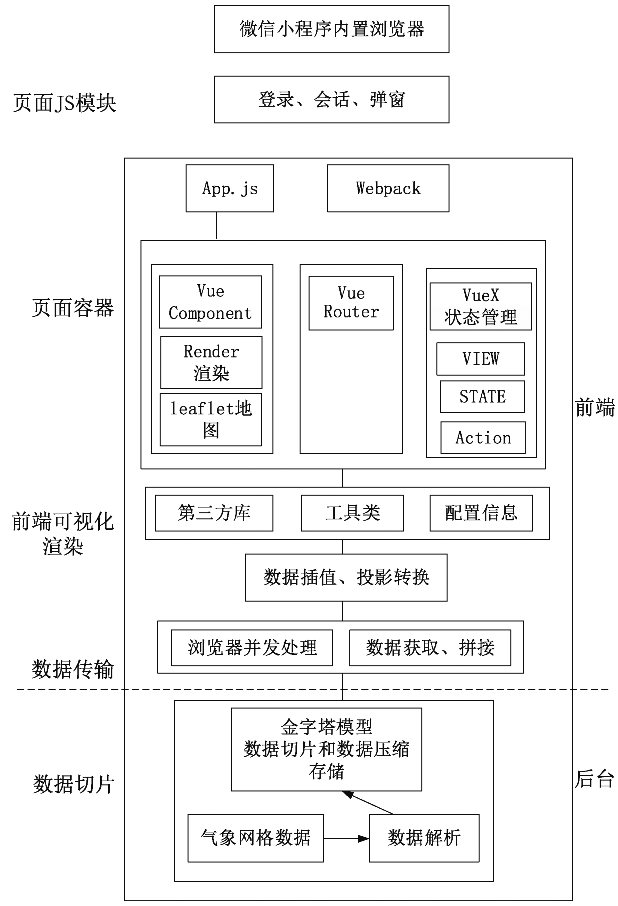

图 1　基于微信小程序的气象可视化系统框架

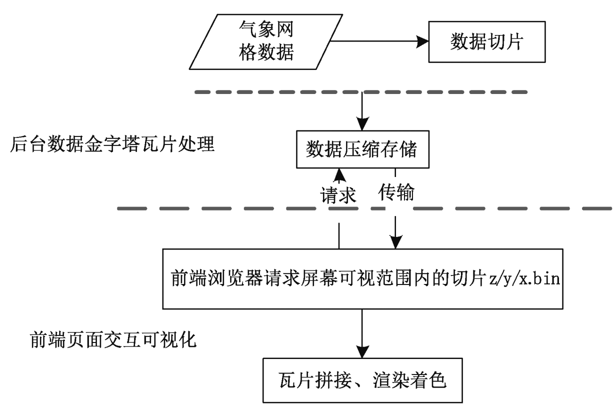

图 2　基于微信小程序的气象可视化系统数据处理流程

和渲染等操作,以此作为本系统的输出结果。

为提升快速展示效果,针对气象数据引入遥感地图金字塔瓦片切分[20-21]的思想。核心流程可描述为将气象网格数据进行多级切片切割,前端请求时根据地图缩放等级加载不同分辨率可视区域的瓦片数据。另外,允许多个进程同时写入数据,以达到

减少数据传输量和加快数据显示的作用。此切片算法将数据以金字塔模型建立，数据经过压缩后进行网络传输，并根据前端显示需要，请求对应层级切片数据进行可视化渲染。

2　技术实现

2.1　数据切片

本文采用中国区域 1 km 分辨率多源融合实况分析产品，经纬度范围 70°～140°E，15°～60°N，单时次文件大小在 100 MB 以上的 7000×4500 的网格数据。若直接通过网络传输并在前端进行渲染，直接加载一个文件渲染时间平均 2 s 以上，并且地图比例尺缩放到最大级别时图片颗粒感严重。若采用后端生成金字塔模型瓦片数据，前端浏览器直接请求可视范围内的文件，用文件存储量的增加换取快速可视化渲染的方案可以明显提升展示效率。

本系统采用以 2 的幂次为基础的切分标准，切分后的瓦片数据以金字塔模型[22-23]进行存储。瓦片地图金字塔模型，即多分辨率的层次模型。首先确定服务所要提供的缩放级别的数量 N。将全球范围分为 2 个正方形瓦片作为金字塔第 1 层级，并将中国区域网格数据对其进行填充。接着依次对其进行分块，从地图图片的左上角开始，从左至右、从上到下进行切割，直至分割成相同大小（如 256×256 像素）的正方形地图瓦片，构成整个瓦片金字塔。以中国区域 1 km 分辨率逐小时降水融合实况分析产品为例进行数据切片，最小瓦片单元是 256×256 的正方形，其中每一个像素点正好对应 1 km 气象网格数据的真实数据点。其他层级的瓦片则需要对真实数据进行逐层抽稀，形成对应的稀疏网格。由于全球范围径向跨 360°，纬向跨 180°，结合金字塔模型对该气象网格数据进行抽稀形成不同层级的金字塔模型气象网格切片数据，结果如表 1 所示。

表 1　中国区域 1 km 分辨率网格数据的金字塔模型数据切割

瓦片层级	数量		瓦片跨度/(°)	每层瓦片像素之间真实网格数据点
	径向	纬向		
1	2	1	180	64
2	4	2	90	32
3	8	4	45	16
4	16	8	22.5	8
5	32	16	11.25	4
6	64	32	5.625	2
7	128	64	2.8125	1

2.2　数据压缩

气象网格数据以浮点型数据存储时，一般占用 4 Byte，在展示时图例最大分辨率为 0.1，因而存储前可将数据保留 1 位有效数字，即原始数据乘以 10 然后取整得到整数。以中国区域 1 km 分辨率逐小时降水网格数据为例，经过上述处理后得到的值域范围为［－32768～32767］，使用 2 进制形式存储，以 .bin 文件保存。对于中国区域的网格数据，实际只存储含有中国区域的数据瓦片，其余区域为无效数据，不生成 .bin 文件。处理完成后，金字塔各层的真实数据压缩，依次为：第 1 层（173×70）、第 2 层（437×140）、第 3 层（875×281）、第 4 层（875×562）、第 5 层（1750×1125）、第 6 层（3500×2250）、第 7 层（7000×4500），这 7 层金字塔按照缩放倍数以 256×256 像素的单瓦片组成[24-25]，单个文件大小约 128 KB，存储目录按照文件名→层数→纬向坐标→径向坐标 .bin，为页面请求做准备。

2.3　数据请求

前端请求时，根据可视区域和地图缩放等级加载不同分辨率气象瓦片数据，同时允许多个进程同时写入数据，以达到减少数据传输量和加快数据显示的作用。此切片算法可将数据以建立金字塔的方式，分割成批量的描述性文件，并根据前端显示需求请求对应级别 zoom 和行列号的切片数据请求数据，并拼接成一个长度为［可视瓦片数×瓦片像素值］的一维数组。

页面可视化过程中，首先获取的屏幕经纬度范围即左上角经度和纬度分别为 (u_x, u_y) 及右下角经度和纬度分别为 (d_x, d_y)，获取瓦片索引公式如下：

$$s_x = e_x - u_x \tag{1}$$

$$l_{\text{start}} = \begin{cases} \operatorname{ent}\left(\dfrac{s_x}{r}\right) + 1, & s_x > 0 \\ 0, & s_x \leqslant 0 \end{cases} \tag{2}$$

$$l_{\text{end}} = l_{\text{start}} + \operatorname{ent}\left(\frac{d_x - u_x}{r}\right) + 1 \tag{3}$$

其中，s_x 为 x 方向屏幕左上角与数据左上角 e_x 的距离，l_{start} 为起始瓦片列索引，l_{end} 为终止瓦片行索引，r 为瓦片长宽。

同理可获取起始及终止瓦片的行、列索引。瓦片的坐标范围肯定是大于屏幕的坐标范围，所以要对所有的瓦片进行偏移。以屏幕坐标左上角为原点，通过计算每个瓦片的左上角点像素坐标与屏幕

左上角点的瓦片像素坐标差值,即可得出在 CSS 中的 position 的偏移值(如 CSS3 的 translate 方法)。

2.4　前端渲染

前端渲染时,在像素点没有对应数据点的地方采用双线性插值[26-29],同时等经纬度数据转化为墨卡托投影数据,采用 WebGL 技术依据数据与色标之间的映射关系渲染成光滑的图像。插值是数字图像处理中重建图像常用的方法。当进行图像放缩时,通过插值方法可以利用源图像重建目标图像。在很多情况下气象数据是单次、不连续的离散数值,如果直接处理为可视化图像产品会有很多无像素值的点(图 3),因而需要通过插值技术生成一连串的中间数据实现光滑的可视化展示效果。插值算法的种类很多,本系统采用最常见、最通用的双线性插值法。此算法运算速度较快,比较容易产生平滑的曲线,并且在很多关键点处也能获得准确精度的数据,其核心实现代码如下:

```
float biInterp(float v00,float v01,float v10,float v11,vec2 r)
{return mix(mix(v00,v01,r.x),mix(v10,v11,r.x),r.y);
    }
```

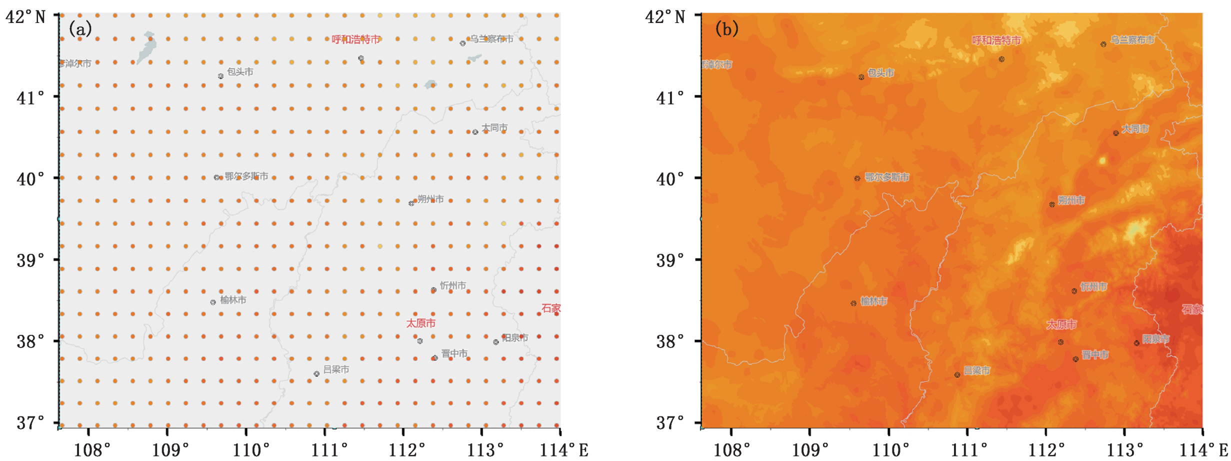

图 3　气象网格数据叠加地图的真实离散点(a)及气象网格数据经过插值渲染后叠加地图的效果(b)

WebGL 技术是通过写在 HTML5 的〈canvas〉标签中,允许 Internet 浏览器访问来实现的 Web 层面的标准,可以通过 JavaScript 来实现调用 OpenGL[30] 等底层图形库进行动画制作等网页渲染。它的优势在于无需安装插件,直接调用显卡 GPU 来加快显示速度[31]。因而,采用 WebGL 技术进行前端渲染不仅可以实现无插件无安装,而且可以保证快速流畅生成气温、气压、降水、相对湿度、能见度、总云量等专题图。本系统基于 WebGL 实现数据加载、数据插值、色标制作并映射的功能,从而快速生成专题图。渲染过程如图 4 所示。使用以上快速渲染方式,响应时间平均 1 s 以内。

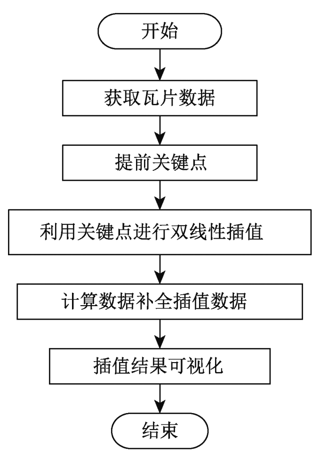

图 4　瓦片数据基于 WebGL 的渲染流程

2.5　前端优化

为提升网页访问速度,在前端性能优化方面通过使用 Ajax 异步加载[32] 的方式,将特定时间段的数据提前请求到浏览器缓存,供页面的快速动态渲染。另外,浏览器一般对同一个服务器的并发连接个数都是有限制的。为解决请求超过浏览器同域名下最大连接数目的情况,采用多域名配置实现并行请求瓦片数据,灰色 stalled 阻塞缩短,访问时长平均提升 4%~50% 之间,测试结果如图 5 所示。

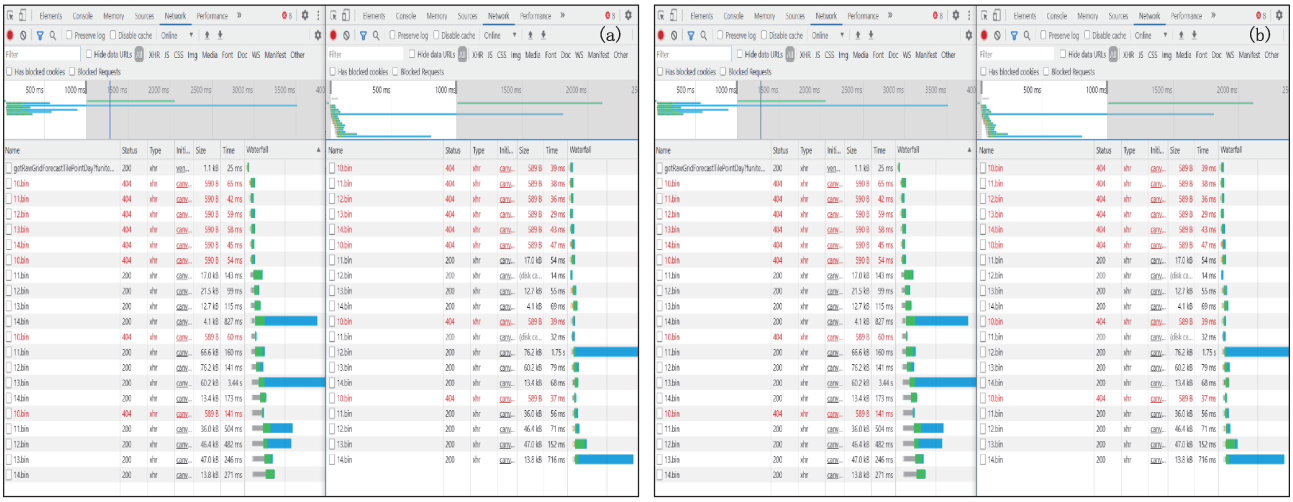

图 5 单域名时(a)与多域名时(b)谷歌浏览器 network 的瀑布图

2.6 数据更新

使用 Vue.js 触发数据更新[33-34]实现数据同步机制。微信小程序通过视图层呈现给用户，通过事件响应用户交互。Vue.js 维护数据变更和逻辑，确保了气象网格数据有较高的更新频次。通过监测数据变化实现更新视图，通过定义数据的展示方式实现只更新数据即可。同时，将 leaflet 组件封装为 Vue component 组件，直接通过传入参数控制地图上显示内容的变化。这样，通过数据变更驱动视图更新。当视图交互触发事件时，例如通过时间轴选取某个时次的操作，事件响应函数修改数据再次触发视图更新。

3 系统应用

本文的设计方案已基于微信小程序实现应用。采用 GPU 进行数据的加速渲染，要求手机内存至少在 4 GB 以上，且在流畅的移动网络下能够获得更为流畅的体验。微信搜索“气象实况 METEO LIVE”可实时查看多种气象要素的气象网格数据的动态渲染效果(图 6)。气象网格数据的高效渲染使得此系统能够提供时效性更强、交互性更强、渲染效果好的气象服务。当前版本的系统自 2020 年 9 月开始业务应用，用户遍布北京、新疆、江苏、广东等多地，在社会公众和气象爱好者中有一定的用户群和影响力。特别是汛期期间，本系统能够基于位置快速查看实况分析产品、站点观测、预警等多类综合信息，在面向各类防灾减灾应急保障中发挥了重要作用。

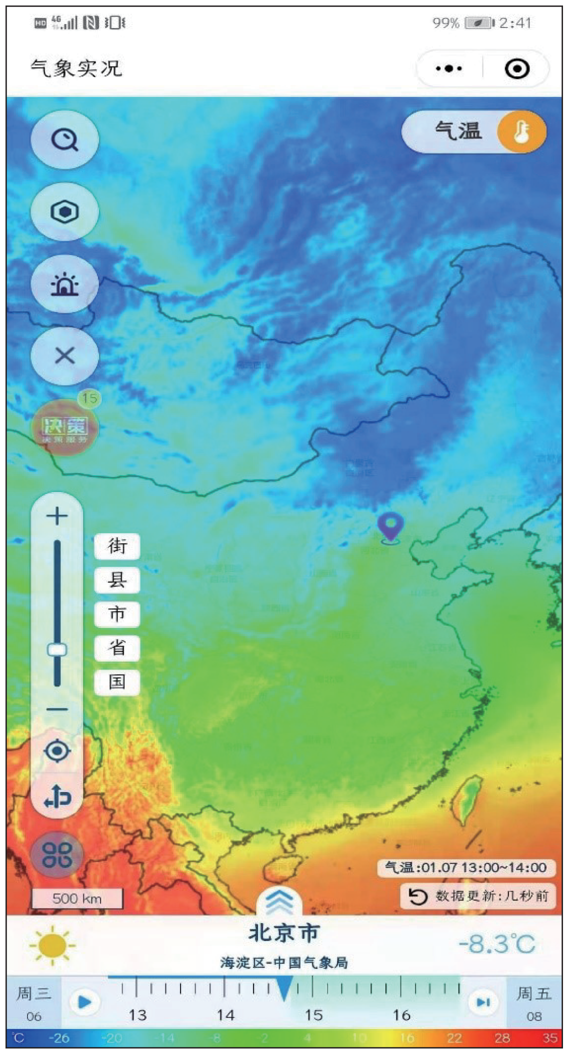

图 6 手机端中国区域 1 h 气温的渲染效果

4　结论与讨论

本文基于 HTML5 的可视化 B/S 框架，采用金字塔模型对气象网格数据进行等经纬度瓦片数据的切割，使用 Node.js、leaflet、WebGL、Canvas 等技术分别对数据切片、压缩及渲染等环节进行了特定处理，同时使用 WebGL 前端渲染技术，构建了移动端气象数据可视化服务系统，使气象数据网络传输和快速可视化的更新时间提升至秒级甚至毫秒级，并依托微信小程序实现该系统的业务应用，服务社会公众的气象信息获取。考虑到使用人数的增加，在今后的研究工作中，将继续优化数据切片压缩和传输效率。同时考虑到气象服务场景的增加，将进一步研究多类型气象要素前端组合展示的渲染方式，依托微信小程序提供更加智能和精细化的气象服务。

参考文献

[1]　唐维红，唐胜宏，廖灿亮. 跨入 5G 时代的中国移动互联网——《中国移动互联网发展报告(2020)》发布[J]. 中国报业，2020，498(17)：34-37.

[2]　张锋，邓闯，李建，等. 基于微信“小程序”的公众气象服务应用[J]. 气象科技，2019，47(2)：361-366.

[3]　徐碧裕，叶朗明，徐加民，等. 专业气象跨平台发布系统及关键技术实现[J]. 气象科技，2021，49(2)：308-314. DOI：10.19517/j.1671-6345.20200197.

[4]　俞胜宾，王文娟. 基于 WebGIS 和 WebGL 的气象数据可视化模块及其应用[C]//第 35 届中国气象学会年会 S14 大数据、互联网、融媒体时代气象服务的创新与变革——第八届气象服务发展论坛. 2018：558-561.

[5]　Yang H P，Sun Y R，Chen N，et al. Quick compression and transmission of meteorological big data in complicated visualization systems [J]. Complexity，2022，May：1-9. https://doi.org/10.1155/2022/6860915.

[6]　胡争光，薛峰，于连庆. 海量气象数据计算处理及可视化在决策气象服务移动平台上的应用[J]. 气象科技，2020，48(5)：615-621+730. DOI：10.19517/j.1671-6345.20190319.

[7]　于连庆，胡争光，薛峰. 面向移动计算平台的气象数据可视化系统关键技术[J]. 气象科技，2022，50(3)：438-448. DOI：10.19517/j.1671-6345.20210145.

[8]　李显风，张玮，李芬，等. 基于 WebGIS 的实况网格产品应用分析平台及关键技术[J]. 气象科技，2020，48(2)：185-194. DOI：10.19517/j.1671-6345.20190167.

[9]　韩帅，师春香，姜志伟，等. CMA 高分辨率陆面数据同化系统(HRCLDAS-V1.0)研发及进展[J]. 气象科技进展，2018，8(1)：102-108+116.

[10]　李哲，周灵. 微信小程序的架构与开发浅析[J]. 福建电脑，2019，35(12)：66-69. DOI：10.16707/j.cnki.fjpc.2019.12.024.

[11]　喻迎春，王妍婕，万昕成. 基于微信的气象灾害预警信息精准智能推送技术的实现[J]. 气象科技，2020，48(2)：195-199. DOI：10.19517/j.1671-6345.20190166.

[12]　陈京华，邓莉，王舒，等. 国家气象业务内网 WebGIS 数据服务系统设计与应用[J]. 气象科技，2020，48(4)：496-502.

[13]　张甜，谭炳全，杨少冬，等. ArcMap 在重庆市标准化气象灾害防御乡镇(街道)创建工作中的应用[J]. 气象科技进展，2021，11(2)：126-128.

[14]　刘媛媛，何文春，王妍，等. 气象大数据云平台归档系统设计及实现[J]. 气象科技，2021，49(5)：697-706.

[15]　韩同欣，何文春，吴鹏，等. 气象基础设施云平台关键设计与实现[J]. 气象科技，2022，50(2)：290-296. DOI：10.19517/j.1671-6345.20210195.

[16]　秦运龙，王迎迎，张冰松，等. 省级外网气象大数据服务平台研究与实现[J]. 气象科技，2020，48(6)：823-828+854. DOI：10.19517/j.1671-6345.20190546.

[17]　杨和平，张志强，杨明，等. 气象格点数据在线可视化平台的设计与开发[J]. 计算机工程与应用，2019(18)：207-211.

[18]　龚旭超. 基于 webGL 的交互绘制应用研究[D]. 杭州：浙江大学，2015.

[19]　詹昌文，苏天赟，王国宇，等. 基于 WebGL 海洋环境要素网络可视化[C]//“一带一路”战略与海洋科技创新——中国海洋学会 2015 年学术论文集，2015：131-141.

[20]　赵丽娟. 瓦片地图在遥感影像专题图中的应用研究[J]. 测绘，2014(1)：17-19.

[21]　唐雅玲，马晨燕，宋佳，等. 矢量 Web 网络地图应用研究[J]. 测绘与空间地理信息，2018，41(2)：77-80+83.

[22]　殷福忠，孙立民. 基于瓦片金字塔技术的地图发布平台开发研究[J]. 测绘与空间地理信息，2010，33(5)：16-17.

[23]　贲进，童晓冲，张衡，等. 基于 TIFF 和 XML 标准的瓦片金字塔模型[J]. 测绘科学技术学报，2005，22(3)：184-186.

[24]　王雪影，王英杰，刘文斌，等. 基于矢量瓦片的铁路 GIS 空间分层表达技术[J]. 铁道建筑，2022，62(10)：156-160.

[25]　王亚平，蒲英霞，刘大伟，等. 基于 TileStache 的多源投影矢量数据瓦片生成方法研究[C]//2014 中国地理信息产业大会，2014.

[26]　陈良，高成敏. 快速离散化双线性插值算法[J]. 计算机工程与设计，2007(15)：3787-3790.

[27]　冯慧君，陶素娟，李隆. 基于双线性插值算法的图像放缩技术与实现[J]. 计算机应用与软件，2004(7)：117-119.

[28]　谌稳，孙立群，李晴岚，等. 近 38 年中国气温和降水的 1km 网格数据集[J]. 气象科技，2021，49(3)：355-361. DOI：10.19517/j.1671-6345.20200344.

[29]　赵春雷，杨鹏，张杏敏，等. 引入 Himawari-8 卫星数据协变量的能见度样条插值方法[J]. 气象科技，2020，48(1)：52-58. DOI：10.19517/j.1671-6345.20190066.

[30]　徐泽骅，李胜，汪国平. 基于 OpenGL 的地图渲染引擎设计与实

现[J]. 地理信息世界,2015,22(6):32-36+50.
[31] 毛开祥. 基于 GPU 的地图切片系统的设计与实现[D]. 西安:西安电子科技大学.
[32] 谌燕,赵定远. 基于 AJAX 的异步 Web 开发模式[J]. 成都大学学报:自然科学版,2008,31(4):313-316.
[33] 李成仁. 基于 Vue.js 的单页面 WebGIS 可视化框架研究与实现[J]. 地理空间信息,2020,18(5):83-86+98.
[34] 朱二华. 基于 Vue.js 的 Web 前端应用研究[J]. 科技与创新,2017(20):119-121.

Research and Application of Fast Rendering Technology of Meteorological Grid Data

CHEN Nan YANG Heping HUO Zimo CHENG Jinghua WANG Jie
(National Meteorological Information Center, Beijing 100081)

Abstract: With the wide application of higher-precision meteorological grid data in meteorological operations, the demand for using high-precision grid data to provide refined meteorological services for the public is growing. Due to the large data file of the meteorological grid, the rendering efficiency over time is slow on the front-end network page. In order to solve this problem, a visualization scheme based on the tile pyramid model for fast transmission and rendering of grid data is proposed. This scheme involves tile cutting, data compression, data interpolation and rendering, and realizes the dynamic visualization process of meteorological grid data under the B/S framework based on HTML5. The China 1-km multi-source gridded products are used to complete the research relying on the WeChat mini program. The experimental results show that the visualization display efficiency of 100-megabyte meteorological grid data is improved to the second level or even millisecond level. The solution of this system can be applied well in all kinds of spatial grid data based on the browser.

Keywords: visualization; tile pyramid; rendering; WebGL; meteorological grid data