

数字地球气象可视化平台（Web + Unreal）

TECH SPEC 技术规格说明

版本：v1.0（与 PRD v1.0 配套）

日期：2026-01-14

文档控制

字段	内容
文档名称	数字地球气象可视化平台（Web + Unreal）TECH SPEC
版本	v1.0
适用范围	后端数据与业务服务 + Web（CesiumJS）+ Unreal（Cesium for Unreal）
对应 PRD	数字地球气象可视化平台_PRD_v1.0
部署形态	公网，无登录

变更记录

版本	日期	变更内容	作者
v1.0	2026-01-14	首次成稿：总体架构、数据管线、API、双端渲染策略、部署与运维、测试与降级。	ChatGPT

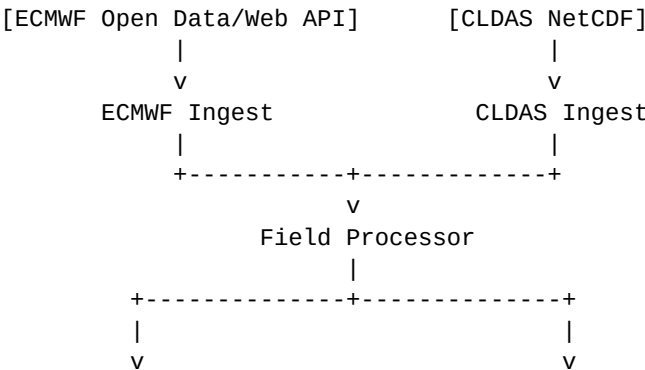
1. 总体架构概述

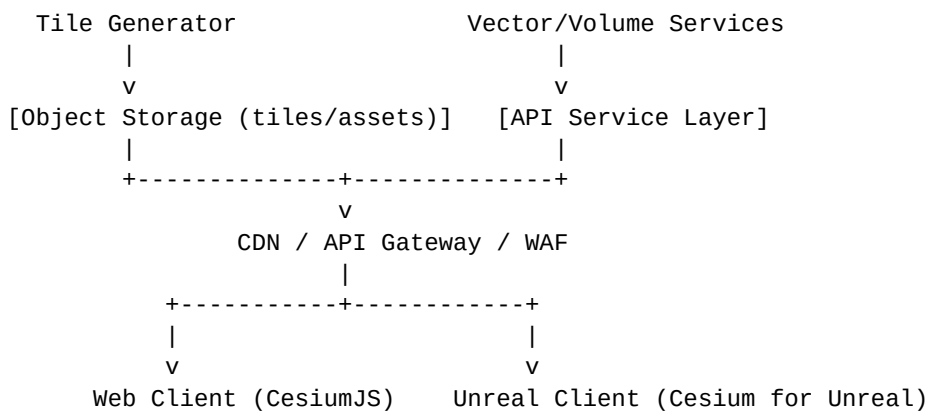
平台采用“同一套数据与业务服务 + Web/Unreal 双端客户端”的架构。后端负责：ECMWF/CLDAS 接入、数据标准化、派生变量计算、瓦片/矢量/体数据产品化、产品/风险/特效业务数据管理、以及公网部署所需的缓存与限流。

1.1 组件与职责

组件	职责	关键输出
ECMWF Ingest	定时拉取 ECMWF 开放数据/接口数据；落原始文件；生成元数据	raw GRIB/NetCDF； ingest 日志； run 可用性
CLDAS Ingest	解析 CLDAS NetCDF（小时）；变量映射；入库与切片	标准化场； 监测瓦片
Field Processor	标准化数据到统一 DataCube；派生：降水差分、风速风向、云密度等	标准化 NetCDF/Zarr； 派生字段
Tile Generator	生成 2D 栅格瓦片（云/降水/风温背景等）；写对象存储；生成图例	PNG/WEBP/KTX2 tiles； legend.json
Vector Service	提供风矢/流线数据（按 bbox 子集），可预计算或实时	JSON/MVT
Volume Service（v2）	按视野/bbox 生成局地云体数据包，供 UE/Web 近景体渲染	volume pack（二进制）
Catalog Service	run/valid_time/level/var 可用性与元数据查询	catalog API
Product Service	存储与查询预报产品（示例/真实）；（v1）提供编辑接口	products API
Risk Service	风险点（POI）管理；规则引擎计算等级与解释	risk API
Effects Service	特效预设参数库；触发映射规则	effects API
Edge（CDN/WAF/GW）	静态与瓦片缓存；限流与防刷；TLS	稳定公网访问

1.2 架构示意（文本）





1.3 关键设计原则

- 中心化取数与缓存：前端不直连 ECMWF，避免频控、并发与许可风险；后端镜像后再分发。
- 全局轻量、局地增强：全局云用 P0 云幕；局地/视野内云用 P2 体积增强（v2）。
- 双端一致性：单位、色标、阈值、时间轴采样规则在后端统一下发，避免 Web/UE 分叉。
- 公网成本控制：瓦片与静态资源尽量 CDN 缓存；限制最大 zoom 与体数据请求范围；监报告警。

2. 技术选型

2.1 客户端

- Web: CesiumJS + TypeScript + WebGL; 状态管理 (Redux/Zustand 等)
- Unreal: Unreal Engine 5.x + Cesium for Unreal + UMG (UI) + Niagara (粒子) + Volumetric Cloud (体积云)

2.2 后端与数据处理

- 数据处理: Python (xarray/cfgrib/ecCodes 等) 或 Java/Go + ecCodes (视团队栈); 推荐 Python 便于快速迭代派生变量。
- 服务端: API (REST) + 任务调度 (Cron/Airflow/Argo Workflows 均可)。
- 存储: 对象存储 (S3/OSS/MinIO) 存瓦片/资源; PostgreSQL/PostGIS 存产品/风险点/元数据; Redis 缓存热点。
- 边缘: CDN + API Gateway + WAF; TLS 证书与域名。

2.3 底图/地形方案 (v0 采用)

- v0 推荐使用 Cesium ion: Cesium World Terrain + 全球影像 (Bing 或 Sentinel-2 Cloudless) + 可选 OSM Buildings。
- Web token 启用 Allowed URLs (Referer 白名单); UE token 独立、最小权限 scopes; 必要时准备自建底图/地形替代 (Copernicus DEM + 开源影像) 作为风险对冲。

3. 数据规范（对外语义）

3.1 时间轴与跑次（run/valid_time）

平台对外采用 valid_time（预报有效时间）驱动动画。后端从 ECMWF 拉取后，按如下规则对外暴露：

- 0-72h：每 3 小时一个 valid_time (0,3,6,...,72)
- 72-240h：每 6 小时一个 valid_time (78,84,...,240)
- 如某 run 缺少部分时效，Catalog 必须明确可用列表，前端 UI 灰显不可用时间点。

3.2 高度层（level）与视觉高度映射

v0 采用固定近似高度用于相机切层与壳层半径（可在配置中调整）：

level	近似高度（km）	用途
sfc	0	地表/2m/10m 要素；点位落地
850	1.5	低层风温/云近似壳层
700	3.0	中低层
500	5.5	中层
300	9.0	高层/对流层上部

v1+ 可选：使用 geopotential height（gh）生成起伏压力面，提高科学性（计算成本更高）。

3.3 变量（variable）与派生规则

变量	内部字段	来源字段（示例）	派生/处理
温度	temp	sfc:2t; pl:t	单位统一为 °C（后端换算）；色标范围按 level 配置
风	wind_u/wind_v/ wind_speed/wind_dir	sfc:10u/10v; pl:u/v	派生风速/风向；用于箭头/流线/粒子
降水	precip_amount/ptype	tp（累积）/ptype 或温度阈值	tp 差分得时段量； ptype 判雨雪；远景贴图+近景粒子
云	tcc/cloud_density	tcc; （v2）pl:RH 等	P0: tcc 云幕；P2: RH->density 映射，输出体数据包

4. 数据工程与产品化

4.1 ECMWF Ingest 流程 (v0)

目标：在后端形成可缓存、可快速渲染的瓦片/矢量数据产品。推荐流程：

- Step 1: 计划任务触发（按 run 周期），拉取所需字段与层：sfc + 850/700/500/300，变量覆盖云/降水/风/温度。
- Step 2: 落地原始文件到对象存储（raw/），记录校验（大小、checksum）与元数据（run、字段、层、时间范围）。
- Step 3: 解码到统一 DataCube（可为 NetCDF/Zarr/Parquet 等内部格式），并做单位换算与缺测处理。
- Step 4: 派生计算：降水差分（3h/6h）、风速风向、（v2）云密度等。
- Step 5: 生成瓦片：按变量/层/valid_time 输出多 zoom 的栅格瓦片（PNG/WEBP；v1 可升级 KTX2）。
- Step 6: 写入 Catalog：登记可用 run、valid_time 列表、变量、层、数据版本号，供前端 UI 构建。

4.2 CLDAS Ingest 流程 (v0/v1)

- Step 1: 监听/批量导入用户提供的 CLDAS NetCDF 小时文件（或 API 拉取）。
- Step 2: 通过配置映射表将 CLDAS 要素码映射到平台内部变量（如 snow_depth、temp_2m、precip_hour）。
- Step 3: 写入 DataCube，并生成对应瓦片（监测层通常只需要局部更高 zoom）。
- Step 4: 在事件模式中支持与 ECMWF 层叠加/对比；v1 增加历史统计与差值层。

4.3 目录结构与对象存储 Key 规范（建议）

统一 Key 规范可以显著降低运维与缓存复杂度。建议：

```
s3://bucket/  
  raw/ecmwf/{run}/...  
  cube/ecmwf/{run}/...  
  tiles/ecmwf/{run}/{var}/{level}/{valid_time}/{z}/{x}/{y}.webp  
  vectors/ecmwf/{run}/wind/{level}/{valid_time}/bbox_{hash}.json  
  volume/ecmwf/{run}/cloud/{valid_time}/bbox_{hash}_res{N}.bin  
  products/{product_id}.json  
  legends/{var}_{level}.json
```

4.4 瓦片规范 (v0)

项	建议值	说明
坐标系	EPSG:4326 (Geographic)	更符合全球气象格点；避免极区墨卡托畸变
Tile Size	256 (v0) / 512 (v1)	根据带宽与清晰度权衡

格式	WEBP（默认） / PNG（兼容）	WEBP 更省带宽；PNG 便于调试
Zoom 范围	0-6（全局）；事件区域可到 8-10	需控制成本；过高 zoom 意义不大（受数据分辨率限制）
色标	后端统一下发 legend.json	保证 Web/UE 一致
缓存	按 run 固化可长缓存；新 run 使用新路径避免刷新	利于 CDN 命中

4.5 视野内云 P2：体数据包（v2）

v2 引入局地体数据包，用于 UE Volumetric Cloud 与 Web 局地体渲染。原则：仅在 Local/飞行近景触发，并对 bbox、分辨率、请求频率设上限。

- 体数据来源：pressure-level RH（或其他云相关变量）-> cloud_density（0-1）。
- 体数据维度：lon×lat×level（850/700/500/300）或插值为等距高度层。
- 分辨率建议：64×64×32 或 96×96×48（视性能）；数据类型 float16/uint8。
- 压缩：zstd；传输为二进制；带元数据头（bbox、levels、scale/offset）。

5. API 设计（REST v1）

5.1 通用定

- Base URL: /api/v1
- 时间格式: ISO 8601 (UTC)
- 错误返回: HTTP 状态码 + JSON {error_code, message, trace_id}
- 无登录: 对公网开放; 通过 CDN/WAF/限流控制滥用; 必要时按 IP/UA/路径分级限流。
- 跨域: Web 端启用 CORS 白名单 (仅允许你的域名) ; UE 客户端不走浏览器 CORS。

5.2 Catalog API

接口	方法	说明	返回
/catalog/ecmwf/runs	GET	列出可用 ECMWF 跑次	runs[]
/catalog/ecmwf/runs/{run}/times	GET	列出该 run 可用 valid_time 列表 (已按采样规则过滤)	times[]
/catalog/ecmwf/runs/{run}/vars	GET	列出可用变量与层	vars/levels
/catalog/cldas/times	GET	列出可用监测时间 (小时)	times[]

5.3 Tiles API

用于 Web/UE 叠加栅格图层。

GET /api/v1/tiles/ecmwf/{run}/{var}/{level}/{valid_time}/{z}/{x}/{y}.webp
GET /api/v1/tiles/cldas/{time}/{var}/sfc/{z}/{x}/{y}.webp

- 返回: image/webp 或 image/png
- 缓存: Cache-Control: public, max-age=31536000 (run 固化时可长期缓存)
- 并发: 由 CDN 承接; 源站需设置合理连接池与限流

5.4 Vector API（风矢/流线）

GET /api/v1/vector/ecmwf/{run}/wind/{level}/{valid_time}?
bbox=minLon,minLat,maxLon,maxLat&stride=4
响应 (JSON) :
{
 "level": 850,
 "valid_time": "...",
 "bbox": [...],
 "stride": 4,
 "grid": [{"lon":..., "lat":..., "u":..., "v":..., ...}]
}

5.5 Volume API（v2：局地云体数据）

GET /api/v1/volume/ecmwf/{run}/cloud/{valid_time}?
bbox=minLon,minLat,maxLon,maxLat&levels=850,700,500,300&res=64

返回：application/octet-stream（二进制）
Header（JSON，前 4KB）：
{
 "run": "...",
 "valid_time": "...",
 "bbox": [...],
 "levels": [850, 700, 500, 300],
 "shape": [64, 64, 32],
 "dtype": "uint8",
 "scale": 0.0039,
 "offset": 0.0,
 "compression": "zstd"
}
Body：zstd 压缩后的 density 数组

5.6 Products / Risk / Effects API

接口	方法	说明
/products? type=snow&valid_time=...	GET	查询产品列表（示例/真实）
/products/{id}	GET	获取产品详情（文本+几何+属性）
/risk/pois?bbox=...	GET	查询风险点 POI（可分页/聚类）
/risk/evaluate? product_id=...&valid_time=...	GET	计算该产品在该时次的风险等级与解释
/effects/presets	GET	获取特效预设参数（滑坡/泥石流等）
/attribution	GET	获取归因与免责声明文本（前端强制展示）

5.7 错误码（建议）

HTTP	error_code	含义	处理建议
400	INVALID_PARAMS	参数不合法（bbox/time/level 等）	前端提示并回退默认值
404	NOT_FOUND	资源不存在（无该 run/time/瓦片）	UI 灰显并提示“该时次无数据”
429	RATE_LIMITED	触发限流	提示稍后重试；降低请求频率
500	INTERNAL_ERROR	服务端异常	展示降级提示；上报 trace_id
503	UPSTREAM_UNAVAILABLE	上游/存储不可用	切换缓存或稍后重试

6. 客户端实现规格

6.1 Web (CesiumJS) 模块划分

模块	职责	关键接口/状态
AppShell	应用壳：路由、全局状态、错误边界、配置加载	AppConfig; FeatureFlags; ErrorBoundary
CatalogClient	拉取 run/time/变量可用性；缓存	getRuns/getTimes/getVars; ETag/TTL
LayerManager	图层树与渲染层管理；颜色表与透明度	add/remove/updateLayer; legend store
TimeController	时间轴播放与步进；驱动图层刷新	play/pause/step; currentValidTime
CameraController	Global/Local/Event/ LayerGlobal 模式切换；FlyTo/锁层	setMode(mode); flyTo(point)
SamplingService	点取样；从后端或本地格点取值	sample(lat,lon,var,level,time)
ParticleEngine	降水粒子（雨/雪）渲染；密度上限与性能保护	setIntensity; setType(rain/snow)
EventMode	事件产品加载、区域渲染、风险点 UI、特效触发（简化）	loadProduct; showPOI; playEffect
Diagnostics	性能面板（FPS/内存/请求数）与日志上报	toggle; reportMetrics

6.2 Web 状态机 (Mode State Machine)

States: GLOBAL -> LOCAL -> (LAYER_GLOBAL) -> LOCAL -> GLOBAL
|
+--> EVENT -> GLOBAL

Transitions:
- GLOBAL --click point--> LOCAL
- LOCAL --lock level--> LAYER_GLOBAL
- LAYER_GLOBAL --back--> LOCAL
- GLOBAL/LOCAL --select event--> EVENT
- EVENT --exit--> GLOBAL

6.3 Unreal (UE) 模块划分

模块	职责	实现要点
CesiumWorld	地理参考、地形/影像/3D Tiles 加载	使用 CesiumGeoreference；配置 ion token；支持 OSM Buildings 可选加载
UI (UMG)	时间轴、层选择、图层树、事件与风险面板、飞行面板	支持鼠标/手柄输入；面板可收起；HUD 常驻
DataClient	请求 Catalog/Tiles/Vector/Volume；	HTTP 请求；磁盘缓存（可选）

	本地缓存	
WeatherRenderer	云/降水/风温图层与特效驱动	云：Volumetric Cloud；降水：Niagara；风温：贴图或材质叠加
FlightSystem	航线编辑、轨迹生成、自动飞行、穿层联动	样条曲线；高度策略；联动 current level/time
EffectSystem	灾害特效预设、触发器、播放控制	Niagara + Decal + 动画；与风险点绑定
Interaction	点选拾取（经纬度）、POI 点击、区域选择	射线拾取到地形/建筑；屏幕 UI 交互优先级管理

6.4 UE 体积云（v0/v2）实现策略

- v0：使用云量（tcc）驱动“云层覆盖率/透明度/层厚”等参数，形成全局可见云效果（不追求完全真实）。
- v2：引入局地体数据包（cloud_density 3D），在 Local/飞行视野内对 Volumetric Cloud 材质输入进行增强（volume texture 或 3D LUT）。
- 性能保护：体积云质量档位（Low/Med/High）；体数据请求频率（例如 $\geq 10s/次$ ）；bbox 上限（例如 $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ ）。

7. 安全、限流与合规

7.1 公网无登录的安全策略

- CDN：瓦片与静态资源强缓存；源站仅承接 cache miss。
- API Gateway：按路径分级限流（Catalog < Tiles < Volume），并返回 429；对异常 UA/IP 做封禁。
- WAF：基础 SQLi/XSS 防护；防止恶意扫描与爬虫。
- 成本阈值：设置告警（QPS、带宽、源站回源率、对象存储请求数）。

7.2 Cesium ion Token 管理

- Web：使用独立 token，并配置 Allowed URLs 仅允许你的域名；token scopes 最小化。
- UE：使用独立 token（不依赖 Referer），仅允许读取必要资产；避免把“管理员 token”打包到客户端。
- 提供“token 轮换与吊销”运维手册；发生盗刷时可快速切换。

7.3 数据归因与免责声明

- 后端提供 /attribution 配置接口或配置文件；前端强制展示。
- 归因文本版本化，便于审计与回溯。
- 任何对外导出（截图/视频）建议叠加水印或字幕（Data: ECMWF + ...）。

8. 部署与运维

8.1 运行环境（建议）

- 容器化：Docker + Kubernetes（或轻量 Docker Compose）
- 对象存储：S3 兼容（MinIO/云 OSS）
- CDN：云 CDN（支持缓存规则与回源鉴权）
- 数据库：PostgreSQL（产品/风险/元数据）；Redis（缓存）

8.2 CI/CD（建议）

- 后端：单元测试 + 集成测试（API） + 镜像构建 + 灰度发布。
- Web：构建后上传静态资源到 CDN 源站；版本化路径；回滚保留上一版本。
- UE：版本打包与发布流水线；配置热更新（产品/风险/特效参数）无需重新打包。

8.3 监控与告警（最低配）

指标	说明	告警阈值示例
API 延迟 P95	Catalog/Vector/Volume 等	P95 > 500ms（持续 5 分钟）
错误率	4xx/5xx	5xx > 1%
CDN 命中率	Tiles 命中	< 80%（持续 30 分钟）
对象存储请求数	PUT/GET/HEAD	异常突增
任务失败	Ingest/Tile 任务	连续失败 2 次

8.4 降级策略（必须实现）

- 无云体数据（v2 未开启或失败）：回退到 P0 云幕。
- 无监测（CLDAS）数据：回退到示例监测层或隐藏监测开关。
- 某 run/time 不可用：Catalog 列表不暴露或 UI 灰显；保持可播放（跳过缺点）。
- 源站压力过大：降低最大 zoom；关闭粒子/体云默认；提示用户切换“性能模式”。

9. 测试与验收

9.1 测试类型

- 单元测试：派生变量计算（降水差分/风速风向/云密度）与风险规则引擎。
- 集成测试：Ingest -> Processor -> Tiles 全链路；API 合同测试（schema）。
- 端到端测试（Web）：核心流程 A/B（点位/事件）自动化回放；关键 UI 不崩。
- UE 测试：关键交互（拾取、时间轴、层切换、飞行、特效触发）手工回归 + 录屏对比（可选自动化）。
- 性能测试：瓦片并发、CDN 命中、volume 请求频率；端侧 FPS 基准场景。

9.2 v0 验收清单（与 PRD 对齐）

- Web：点位仰视-锁层-层全局闭环；四要素可开关；时间轴播放；事件模式与风险点解释；简化特效。
- UE：同上 + 交互飞行穿层 + 至少 1 种灾害特效（可控播放）。
- 后端：ECMWF 数据链路稳定；Catalog 与 Tiles 可用；限流与归因生效；监控可用。

10. 开放问题（需在实施中关闭）

- ECMWF 取数方式最终选型：Open Data 镜像拉取 vs Web API（MARS）按需裁剪（可并存）。
- CLDAS 实际字段与坐标系：收到真实样例后完成变量映射与范围确认。
- UE 体积云数据映射：采用 volume texture 还是参数驱动（取决于期望拟真与性能）。
- 灾害特效范围：v0 选滑坡还是泥石流作为首个特效（建议先滑坡：成本更低）。